



Potentiale des Strommanagements zur Reduzierung des spezifischen Energiebedarfs von Pkw

Thomas Grube

Forschungszentrum Jülich GmbH
Institut für Energie- und Klimaforschung (IEK)
Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-3)

Potentiale des Strommanagements zur Reduzierung des spezifischen Energiebedarfs von Pkw

Thomas Grube

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment

Band / Volume 216

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-89336-961-4

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek.
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte Bibliografische Daten
sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Herausgeber
und Vertrieb: Forschungszentrum Jülich GmbH
Zentralbibliothek, Verlag
52425 Jülich
Tel.: +49 2461 61-5368
Fax: +49 2461 61-6103
E-Mail: zb-publikation@fz-juelich.de
www.fz-juelich.de/zb

Umschlaggestaltung: Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH

Druck: Grafische Medien, Forschungszentrum Jülich GmbH

Copyright: Forschungszentrum Jülich 2014

Schriften des Forschungszentrums Jülich
Reihe Energie & Umwelt / Energy & Environment, Band / Volume 216

Zugl.: Berlin, Technische Universität, Diss., 2014

ISSN 1866-1793

ISBN 978-3-89336-961-4

Vollständig frei verfügbar im Internet auf dem Jülicher Open Access Server (JUWEL)
unter www.fz-juelich.de/zb/juwel

Alle Rechte vorbehalten. Kein Teil des Werkes darf in irgendeiner Form (Druck, Fotokopie oder
in einem anderen Verfahren) ohne schriftliche Genehmigung des Verlages reproduziert oder
unter Verwendung elektronischer Systeme verarbeitet, vervielfältigt oder verbreitet werden.

POTENTIALE DES STROMMANAGEMENTS ZUR REDUZIERUNG DES SPEZIFISCHEN ENERGIEBEDARFS VON PKW

von Thomas Grube

KURZFASSUNG

Im Kontext politisch-motivierter, energiestrategischer Zielsetzungen werden auch im Straßenverkehr deutlich reduzierte Kraftstoffverbräuche und Schadstoffemissionen angestrebt. Für Pkw beziehen sich entsprechende Entwicklungsanstrengungen auf die kontinuierliche Verbesserung von Verbrennungsmotorantrieben sowie auf Hybrid- und emissionsfreie Elektroantriebe mit Brennstoffzellen und mit Batterien.

Der Kraftstoffverbrauch von Pkw ist in starkem Maße von der Art der Fahrzeugnutzung abhängig und wird von fahrzyklusbedingten mechanischen sowie von thermischen und elektrischen Leistungsbedarfen beeinflusst. Typprüfwerte auf Basis heute üblicher Testverfahren geben dabei aufgrund der Beschränkung auf wenige Fahrprofile sowie aufgrund von spezifischen Vorgaben, die den Betrieb von Nebenverbrauchern betreffen, reales Verbrauchsverhalten nur unzureichend genau wieder.

Daraus abgeleitet besteht das Ziel der vorliegenden Arbeit in der Ermittlung des Verbrauchsreduktionspotentials für unterschiedliche Pkw-Antriebskonzepte unter Berücksichtigung konzeptspezifischer Optionen der Strombereitstellung und -nutzung. Dazu werden Pkw mit Verbrennungsmotor (ICV), Parallelhybride mit Verbrennungsmotor (PAH), Elektro-Pkw mit Batterie (BEV) und mit Brennstoffzellen im Direktwasserstoffbetrieb (FCV) mithilfe simulationsgestützter Kraftstoffverbrauchsanalysen untersucht. Spezifisches Merkmal dieser Analyse ist der einheitliche Bearbeitungsansatz hinsichtlich der Gestaltung der Simulationsmodelle, deren Parametrierung sowie der Einbeziehung mechanischer, elektrischer und thermischer Lastprofile. Im Ergebnis stützt sich die Potentialermittlung auf eine große Menge an ermittelten Verbrauchsdaten, die aus der Definition zweier Berechnungsszenarien, der Verwendung von 25 Fahrzyklen sowie der Festlegung von vier Klimatisierungs- und Bordnetzlastfällen resultiert.

Die Anwendung der entwickelten Modellumgebung hat gezeigt, dass das gewählte Verfahren geeignet ist, konzept- und lastfallspezifische Verbrauchsunterschiede bei vertretbarem Zeitaufwand für Modellparametrierung und Berechnungsdurchlauf aufzuzeigen. Auf Basis der durchgeführten Analyse können Verbrauchsreduktionspotentiale jeweils gegenüber heutigen ICV mit Ottomotor für PAH mit 30 % bis 60 %, für BEV mit 76 % bis 86 % und für FCV mit 50 % bis 67 % abgeleitet werden. Bezüglich des Einsatzes von thermoelektrischen Generatoren und von Photovoltaikmodulen konnte ein Verbrauchsreduktionspotential unter idealisierten Bedingungen von maximal 15 % festgestellt werden.

Im Vergleich zu Literaturangaben stellt die vorliegende Arbeit Verbrauchswerte für ein deutlich breiteres Spektrum der Fahrzeugnutzung – sowohl die Fahrprofile als auch den Betrieb von Nebenverbrauchern betreffend – zur Verfügung und erlaubt damit eine verbesserte Bewertung des Verbrauchsverhaltens von Pkw.

POTENTIAL OF ELECTRICITY MANAGEMENT STRATEGIES FOR REDUCING THE SPECIFIC ENERGY USE OF PASSENGER CARS

by Thomas Grube

SUMMARY

In the context of politically motivated, strategic energy targets, there is also a need to considerably cut fuel consumption and emissions in the road traffic sector. For passenger cars, relevant development efforts concentrate on continuously improving internal combustion engines as well as on hybrid and zero-emission electric drives with fuel cells and with batteries.

The fuel consumption of passenger cars depends strongly on how the vehicle is actually used, and it is affected by the mechanical power requirements, which in turn depend on the driving cycle, as well as on the thermal and electrical power requirements. Type approval values based on today's accepted test procedures, which are limited to a few driving profiles and specific default settings for the operation of auxiliary consumers, fail to accurately reflect real-world fuel consumption.

Against this background, the present thesis aims to determine the potential of different vehicle drive concepts for reducing the fuel consumption of passenger cars taking into account concept-specific options for supplying and consuming power. To this end, vehicles with internal combustion engines (ICVs), parallel hybrids with an internal combustion engine (PAHs), battery electric vehicles (BEVs), and fuel cell vehicles in direct hydrogen operation (FCVs) will be investigated using simulation-based fuel consumption analysis. The unique characteristic of this analysis is the uniform approach with respect to the design of the simulation models, their parameterization, and the selection of mechanical and auxiliary electrical, and thermal load profiles. The result was an evaluation of potential based on a large quantity of consumption data arising from the definition of two calculation scenarios, the application of 25 driving cycles, and the implementation of four air-conditioning and on-board power supply load profiles.

The application of the developed model environment showed that the selected procedure is suitable for identifying differences in consumption depending on the concept and loading conditions within a reasonable time for model parameterization and calculation processes. On the basis of the analyses performed, the potential for reducing fuel consumption compared to today's ICV with a gasoline engine was determined as 30–60 % for PAHs, 76–89 % for BEVs, and 50–67 % for FCVs. With respect to the use of thermoelectric generators and photovoltaic modules, a maximum potential of 15 % was identified for reducing fuel consumption under idealized conditions.

Compared to analyses in the literature, the current work presents detailed consumption data for a much broader range of vehicle driving and auxiliary power profiles, thus improving the evaluation of the fuel consumption of passenger cars.

INHALTSVERZEICHNIS

1	EINFÜHRUNG UND ZIELSETZUNG	1
1.1	Zielsetzung und Aufgabenstellung	2
1.2	Definition der Antriebstopologien.....	5
2	ENTWICKLUNG DES MODELLANSATZES	7
2.1	Begriffsbestimmungen	7
2.2	Simulationsgestützte Kraftstoffverbrauchsanalyse.....	9
2.3	Beschreibung des Modellansatzes.....	10
3	SPEZIFIZIERUNG DER LEISTUNGSBILANZEN	13
3.1	Festlegung der Fahrzeug- und Antriebsparameter.....	13
3.2	Längsdynamisches Modell und Fahrleistungsanforderungen	15
3.3	Skalierung des Antriebs.....	20
3.4	Festlegung der Fahrzyklen	21
3.5	Bordnetz und elektrische Verbraucher	23
3.6	Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums	27
3.7	Bereitstellung mechanischer Antriebsleistung.....	33
3.7.1	Verbrennungsmotoren	34
3.7.2	Elektrische Maschinen	36
3.7.3	Kraftübertragung	38
3.8	Bereitstellung elektrischer Leistung für Antrieb und Bordnetz.....	39
3.8.1	Batterien.....	39
3.8.2	Brennstoffzellensysteme	46
3.8.3	Gleichspannungswandler.....	50
3.8.4	Thermoelektrische Generatoren (TEG)	51
3.8.5	Photovoltaikmodule.....	52
3.9	Fazit.....	53
4	STROMNUTZUNG IN PKW-ANTRIEBEN	55
4.1	Verbrauchsreduktion durch Hybridisierung	55
4.1.1	Funktionalitäten der Antriebskonzepte.....	57
4.1.2	Festlegung der Betriebsstrategie	59
4.1.3	Spezifizierung der Bewertungsfunktion.....	62
4.1.4	Verfahren der Ladezustandssteuerung.....	64

4.2	Verbrennungsmotor-Pkw – ICV	65
4.3	Parallelhybrid mit Verbrennungsmotor – PAH	65
4.4	Batterie-Pkw – BEV	68
4.5	Brennstoffzellen-Pkw – FCV	69
4.6	Fazit	70
5	DYNAMISCHE SYSTEMSIMULATION	71
5.1	Allgemeine Simulationsaufgaben und Berechnungsablauf	72
5.2	Charakterisierung des Modellansatzes	76
5.3	Fahrzyklussimulationen	77
5.4	Bestimmung der Leistungsklassen von Antriebskomponenten	78
5.5	Komponentenmodelle	80
5.5.1	Verbrennungsmotor	80
5.5.2	Elektromaschinen	82
5.5.3	Kraftübertragung	84
5.5.4	Brennstoffzellensystem	84
5.5.5	Batterie	85
5.5.6	Leistungselektronik	86
5.6	Thermische Integration	88
5.7	Verbrauchsoptimierende Laststeuerung	88
5.7.1	Definition von Options- und Gültigkeitsvektoren	90
5.7.2	Ermittlung des Achsmoments	91
5.7.3	Optionale Getriebeeingangsmomente und -drehzahlen	92
5.7.4	Optionale Drehmomente der Antriebsmaschinen	93
5.7.5	Energetische Bewertung des Gesamtsystems bei ICV, PAH und BEV	96
5.7.6	Optionale elektrische Leistungen des Brennstoffzellensystems	100
5.7.7	Energetische Bewertung und Ansteuerung des BZ-Systems bei FCV	101
5.7.8	Wahl der Gangstufen und Sollwerte der Antriebsmaschinen	102
5.7.9	Rekuperatives Bremsen	104
5.8	Umsetzung der Gesamtfahrzeugmodelle	105
5.8.1	Verbrennungsmotor-Pkw – ICV	106
5.8.2	Parallelhybrid-Pkw – PAH	107
5.8.3	Batterie-Pkw – BEV	108
5.8.4	Brennstoffzellen-Pkw – FCV	109

5.9	Fazit.....	110
6	BESTIMMUNG DES VERBRAUCHSREDUKTIONSPOTENTIALS.....	113
6.1	Definition von Untersuchungsmatrix und Berechnungsszenarien	113
6.2	Ergebnisse und Diskussion	118
6.2.1	Verbrennungsmotor-Pkw – ICV	119
6.2.2	Parallelhybrid-Pkw – PAH.....	125
6.2.3	Batterie-Pkw – BEV	131
6.2.4	Brennstoffzellen-Pkw – FCV	134
6.3	Thermoelektrische Generatoren und Photovoltaikmodule	137
6.4	Spezifische Energie der Batterie bei BEV	139
6.5	Bewertung der Ergebnisse	140
6.6	Fazit.....	143
7	ZUSAMMENFASSUNG.....	145
	BIBLIOGRAPHIE.....	149
	ANHANG.....	159
	Anhang A: Verzeichnis der Abbildungen	161
	Anhang B: Verzeichnis der Tabellen.....	165
	Anhang C: Verzeichnis der Abkürzungen, Formelzeichen und Indices	167
	Anhang D: Simulationsgestützte Kraftstoffverbrauchsanalyse – Beispiele.....	171
	Anhang E: Verwendete Symbolik zur Darstellung der untersuchten Konzepte	173
	Anhang F: Fahrzeugklassenbezeichnungen.....	175
	Anhang G: Verwendete Fahrzyklen	177
	Anhang H: Leistungs- und Betriebsdaten von Batterien	185
	Anhang I: Ergebnisvektor der Simulationsmodelle	191
	Anhang J: Massen der Antriebskomponenten	193
	Anhang K: Ergebnisse der Kraftstoffverbrauchsbestimmung	195
	Anhang L: Wirkungsgrade und energetische Nutzungsgrade	239
	Anhang M: Ermittelte Verbrauchsreduktionspotentiale	253
	DANKSAGUNG	255

1 Einführung und Zielsetzung

Wesentliche Ziele einer allgemein als notwendig erachteten Neuausrichtung der Energieversorgung sind verringerte globale und lokale Umwelteinwirkungen, eine hohe Versorgungssicherheit sowie die Stärkung der wirtschaftlichen Wettbewerbsfähigkeit. Die nachfolgenden, für das Jahr 2010 gültigen Angaben begründen die besondere Rolle der Mobilität in Deutschland bezüglich dieser Ziele. Der deutsche Straßenverkehr verursacht etwa ein Sechstel der gesamten Treibhausgasemissionen und ist mit einem Anteil von 95 % fast vollständig von importiertem Mineralöl abhängig. Die Automobilindustrie trägt mit etwa 13 % zum Bruttoinlandsprodukt bei und zählt damit zu den umsatzstärksten Industriezweigen in Deutschland. Der Anteil deutscher Konzernmarken an der Weltautomobilproduktion liegt bei 16 %.

Die deutsche Bundesregierung hat zahlreiche Programme zur Förderung mobilitätsbezogener Energiewandlungs- und Speichertechnologien initiiert [1, 2, 3, 4, 5]. Effizienzsteigerungen von Fahrzeugantrieben, verringerte direkte und indirekte Emissionen von Fahrzeugen sowie der Einsatz regional verfügbarer, treibhausgasarmer Primärenergiequellen bilden darin wesentliche Schwerpunkte. Auch weltweit zeigen Forschungs-, Entwicklungs- und Demonstrationsaktivitäten im Bereich von Antriebstechnologien, dass heutige benzin- oder dieselbetriebene Antriebe mit Verbrennungsmotor zunehmend mit alternativen Fahrzeugantrieben und Kraftstoffen im Wettbewerb stehen. Schwerpunkte von Pkw-Entwicklungen sind:

- weiterentwickelte, zum Teil hybridisierte Antriebe mit Verbrennungsmotoren,
- *Plug-in* Hybride mit Verbrennungsmotor,
- Elektrofahrzeuge mit Batterie,
- Elektrofahrzeuge mit Brennstoffzelle.

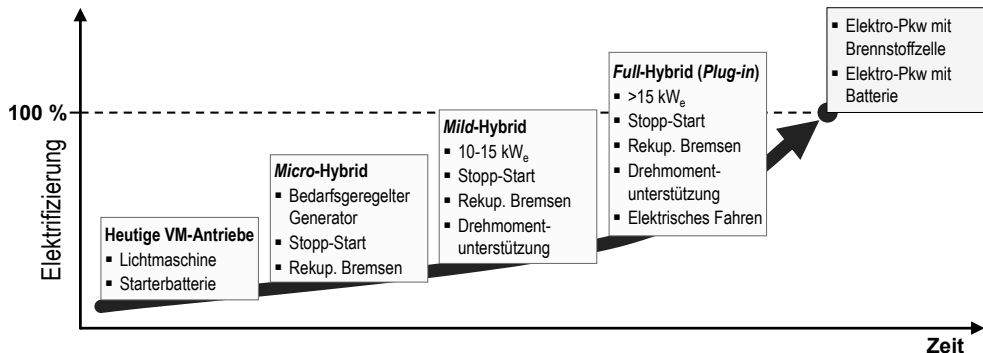
Die genannten Konzepte machen deutlich, dass der Nutzung elektrischer Energie in Pkw wachsende Bedeutung zukommt, siehe **Bild 1-1**. In Serien-Pkw mit Verbrennungsmotor ist bereits heute ein stetig wachsender, antriebsunabhängiger Bedarf an elektrischer Leistung im Bordnetz erkennbar, der mit erweiterten Komfort- und Sicherheitsfunktionen zusammenhängt. Teilweise sind Stopp-Startfunktionen und Bremsenergierückgewinnung verfügbar, die bezogen auf den Europäischen Fahrzyklus zu Verbrauchsreduktionen im Bereich von 5 bis 10 % beitragen. Der erweiterte Einsatz von Elektromaschinen und elektrischen Speichern in Hybridkonzepten trägt durch eine optimierte Betriebsweise des Verbrennungsmotors in verstärktem Maße zu verringerten Kraftstoffverbräuchen bei. Elektroantriebe mit Batterien und Brennstoffzellen führen aus heutiger Sicht zu geringsten Kraftstoffverbräuchen.

Mit Bezug auf die oben genannten energiestrategischen Ziele ist die Bewertung von Pkw-Konzepten hinsichtlich der Kriterien Ressourcenverbrauch, Umweltwirkungen und Kosten von zentraler Bedeutung. In diesem Zusammenhang spielen Kraftstoffverbrauchsangaben eine wesentliche Rolle. Die zu deren Ermittlung notwendige Kraftstoffverbrauchsanalyse

(*Tank-to-wheel* Analyse, TTW) bildet neben der Analyse der Bereitstellung von Kraftstoffen (*Well-to-tank* Analyse, WTT) den zweiten Baustein der Prozesskettenanalyse der Kraftstoffbereitstellung und -nutzung (*Well-to-wheel* Analyse, WTW).

Bild 1-1: Trend zu höherem Elektrifizierungsgrad von Pkw-Antrieben.

VM: Verbrennungsmotor; Rekup. Bremsen: Rekuperatives Bremsen.



Kraftstoffverbrauchsanalysen können unter Anwendung von definierten Fahrzyklen durch Messungen an realen Fahrzeugen, oder mithilfe computergestützter Simulationen durchgeführt werden. Zur Ermittlung streckenbezogener Kraftstoffverbrauchsangaben mit der Einheit $[l (100km)^{-1}]$ und CO_2 -Emissionen mit der Einheit $[g_{CO_2} km^{-1}]$, die als Typprüfwerte für kommerziell erhältliche Serien-Pkw zur Verfügung stehen, werden messtechnische Verfahren angewandt. Für die Europäische Union (EU) sind die dabei anzuwendenden Testverfahren durch die Verordnung (EG) 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates [6] verbindlich festgelegt. Weltweit ist eine Vielzahl von meist nationalen Regelungen dieser Art vorhanden, die bezüglich der anzuwendenden Testverfahren zum Teil deutlich voneinander abweichen. Für Pkw-Konzepte, die sich noch in der Entwicklung befinden, stehen teilweise Kraftstoffverbrauchsmesswerte zur Verfügung, die sich häufig ebenfalls auf standardisierte Testverfahren beziehen.

Die computergestützte Simulation bietet Vorteile, wenn Analysen unabhängig vom realen Fahrzeug durchgeführt werden sollen, beispielsweise in der Entwicklung von Fahrzeugkonzepten oder von einzelnen Komponenten sowie bei der Bearbeitung spezifischer Fragestellungen der Bewertung von Fahrzeugkonzepten. Der Einfluss äußerer Fahrzeugparameter oder veränderter Antriebstopologien kann mithilfe der Simulation bei im Vergleich zur technischen Realisierung reduziertem Aufwand untersucht werden. Im Zusammenhang mit der vorliegenden Arbeit wird die computergestützte Simulation als Werkzeug zur vergleichenden Bewertung ausgewählter Fahrzeugkonzepte eingesetzt.

1.1 Zielsetzung und Aufgabenstellung

Wie bereits dargestellt wurde, sind aktuell Fahrzeugkonzepte in der Entwicklung, bei denen durch die Nutzung elektrischer Energie im Antrieb ein reduzierter Kraftstoffverbrauch erzielt

werden soll. Die vergleichende Bewertung solcher Konzepte sowohl untereinander als auch in Relation zu heutigen Massenmarkt-Pkw ist schwierig. Verfügbare Verbrauchsdaten sind auf jeweilige Versuchsträger bezogen, die sich auch in den spezifischen Widerstandsbeiwerten und Massen der Basisfahrzeuge ohne Antrieb und Speicher unterscheiden. Grundlage der Verbrauchsbestimmung sind darüber hinaus häufig einzelne Fahrzyklen, wobei Lastprofile antriebsunabhängiger Nebenverbraucher meist vernachlässigt werden. Eine verbesserte Bewertung von Möglichkeiten zur Verbrauchsreduktion durch veränderte Antriebstopologien und optimierte Betriebsstrategien erfordert daher eine breite Datenbasis, die die Wirkung solcher Maßnahmen für unterschiedliche Nutzungsmuster sichtbar werden lässt. Im Vorfeld der technischen Realisierung und nachfolgenden aufwendigen Erprobung der Konzepte können rechnerische Verbrauchsbestimmungen diese Effekte quantifizieren helfen.

Daraus lässt sich als Aufgabenstellung die Untersuchung und Bewertung des Potentials der Nutzung elektrischer Energie zur Verbrauchsreduktion bei Pkw anhand heute diskutierter Pkw-Konzepte ableiten. Die dafür notwendige Definition eines einheitlichen Analyserahmens erfordert vor allem die Festlegung

- verbrauchsrelevanter Fahrzeugparameter,
- zu erfüllender Fahrleistungsanforderungen,
- mechanischer, elektrischer und thermischer Lastprofile.

Eine wesentliche Herausforderung besteht in der Definition der anzuwendenden Lastprofile von Antrieb und Nebenverbrauchern. Das Lastprofil des Antriebs resultiert bei gegebenen Fahrzeugparametern aus den zeitabhängigen Geschwindigkeitsvorgaben und der Topographie der gefahrenen Strecke. Die Verwendung von Standardfahrzyklen wie dem MVEG-Zyklus¹ als Teil der oben genannten Verordnung stellt zwar einerseits die Vergleichbarkeit von Verbrauchsangaben her. Reales Nutzerverhalten, das durch große Variationsbreiten zahlreicher Einflussfaktoren gekennzeichnet ist, wird andererseits aber nur im Ausnahmefall repräsentiert. Die Nutzung unterschiedlicher Fahrprofile, zum Beispiel eingeteilt nach Stadt-, Überland- und Autobahnfahren ist daher notwendig, da sie eine Präzisierung der Vor- und Nachteile von Antriebskonzepten bezüglich solcher Nutzungsmuster erlaubt.

Über die Auswahl des „richtigen“ Fahrprofils hinaus gewinnt die Berücksichtigung antriebsunabhängiger Lastprofile von Nebenverbrauchern an Bedeutung. Bereits in heutigen Pkw kann der Wärmebedarf des Fahrzeuginnenraums abhängig vom Betriebszustand der Antriebsmaschine sowie von den Umgebungsbedingungen nicht mehr vollständig durch die Nutzung von Motorabwärme gedeckt werden. Wärme wird dann zum Beispiel mithilfe eines Brennstoffzuheizers und damit unter erhöhtem Kraftstoffverbrauch bereitgestellt. Für Pkw-Konzepte, die zunehmend elektrische Leistung im Antrieb nutzen, ergeben sich deutlich

¹ Die *Motor Vehicle Emissions Group* (MVEG) ist eine von der Europäischen Kommission eingerichtete Arbeitsgruppe.

komplexere Energieflüsse, da Versorgungsaufgaben, wie Fahrzeugklimatisierung und Bordnetzversorgung vollständig oder teilweise vom Betrieb der Antriebsmaschine entkoppelt werden müssen.

Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, für Pkw das Potential zur Verbrauchsreduktion durch die verstärkte Nutzung von Strom im Antrieb unter Berücksichtigung der dadurch veränderten technischen Randbedingungen der Bereitstellung von Strom für das Bordnetz und Wärme oder Kälte zur Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums besser bewerten zu können. Der dafür durchzuführende systemanalytische Vergleich soll in einem einheitlichen Ansatz für eine, gegenüber heute verfügbaren Angaben aus der Literatur (siehe hierzu Abschnitt 2.2), breitere Auswahl von Pkw-Konzepten und unter Zugrundelegung von bisher nicht einbezogenen thermischen und elektrischen Lastprofilen durchgeführt werden. Auf diesem Wege sollen verbesserte Einschätzungen des Einflusses antriebsunabhängiger Lastprofile auf Kraftstoffverbrauch und Reichweite möglich werden. Die Analyse soll darüber hinaus unterschiedliche Nutzungsprofile einbeziehen, die sich in unterschiedlichen Fahrzyklen sowie in verschiedenen stark ausgeprägter Nutzung von Nebenverbrauchern im Bordnetz widerspiegeln.

Als Bewertungskriterium wird der als Energiebetrag ausgedrückte spezifische Kraftstoffverbrauch E^{ch} für chemische Energieträger beziehungsweise E^e für elektrische Energie mit der Einheit $[MJ\ km^{-1}]$ festgelegt. Als Kraftstoffe kommen Benzin und Diesel für Pkw mit Verbrennungsmotor (*Internal combustion engine vehicle*, ICV) und hybridelektrische Pkw mit Verbrennungsmotor (*Hybrid-electric vehicle*, HEV) sowie Wasserstoff für Pkw mit Brennstoffzellen (*Fuel cell vehicle*, FCV) zum Einsatz. Für das Strom-„tankende“ Konzept batterieelektrischer Pkw (*Battery-electric vehicle*, BEV) wird der spezifische Stromverbrauch E_{Netz}^e mit der Einheit $[MJ\ km^{-1}]$ ermittelt.

Methodisch soll sich die Analyse auf die Entwicklung und Anwendung dynamischer Gesamtfahrzeugmodelle der zu untersuchenden Fahrzeugkonzepte (siehe Abschnitt 1.2) stützen. Auf diese Weise lässt sich, wie gefordert, der Einfluss zeitabhängiger Lastprofile auf die Betriebszustände von Antriebskomponenten und Nebenverbrauchern und damit auf die Energiebilanz der Gesamtsysteme darstellen. Darüber hinaus erlaubt die dynamische Simulation auch die Entwicklung komplexer Betriebsstrategien, die insbesondere bei der Analyse hybrider Antriebsstrukturen als Mittel zur energetischen Optimierung notwendig sind. Zu entwickelnde Betriebsstrategien sollen dabei ausschließlich momentan verfügbare Werte von Betriebsparametern verwenden.

Der in dieser Arbeit entwickelte Modellansatz beinhaltet neben den Modellvarianten der zu untersuchenden Konzepte auch ProgrammROUTINEN zur Ausführung unterschiedlicher SimulationSAufgaben. Dazu gehören zum einen SkalierungROUTINEN zur Bestimmung von Masse und nominaler Leistung der Antriebskomponenten einschließlich der Speicher. Zum anderen dienen solche ProgrammROUTINEN der automatisierten Parametrierung der Modelle einschließlich der Fahrzyklus- und LastprofilAuswahl. Detailliertere Erläuterungen zum Modellansatz sind im Abschnitt 2.3 zu finden.

Die Spezifizierung der Lastprofile, die sich aus Fahrbetrieb, Bordnetz- und Wärmebedarf ergeben, erfolgt in den Abschnitten 3.2 bis 3.6. Die längsdynamische Fahrzeugsimulation bildet dabei den Ausgangspunkt der konzeptübergreifend einheitlichen Ermittlung von Drehmoment und Drehzahl am Ausgang des Achsantriebs. Im Abschnitt 3.7 werden die in den untersuchten Konzepten verwendeten Optionen der Bereitstellung mechanischer Antriebsleistung erläutert. Die zur Strombereitstellung erforderlichen Komponenten werden im Abschnitt 3.8 dargestellt. Abschnitt 4.1 beschreibt die Funktionalitäten, die in den untersuchten Konzepten zur Verbrauchsreduktion beitragen sollen. In den Abschnitten 4.2 bis 4.5 werden diese zu konzeptspezifischen Funktionsumfängen zusammengeführt.

Gestaltung und Funktionsweise der Simulationsmodelle bilden den Inhalt von Kapitel 5, wobei die Beschreibung des Vorgehens bei der leistungsbezogenen Skalierung der zu untersuchenden Antriebsstränge auf Basis gegebener Leistungsanforderungen an den Antrieb im Abschnitt 5.4 erfolgt. Die Umsetzung der Komponentenmodelle wird im Abschnitt 5.5 erläutert. Die Vorgehensweise bei der wärmetechnischen Integration ist Inhalt von Abschnitt 5.6. Die Umsetzung der Betriebsstrategien in den Modellen als Ausgangspunkt der energetischen Optimierung wird im Abschnitt 5.7 beschrieben.

Im Abschnitt 6.1 werden die im Rahmen der Anwendung des Modells zur Potentialermittlung erforderlichen Simulationaufgaben definiert. Abschnitt 6.2 beinhaltet Darstellung und Diskussion der Ergebnisse.

1.2 Definition der Antriebstopologien

Im Folgenden sollen die in der Einführung genannten Pkw-Konzepte für die Analyse definiert werden. Es werden vier Antriebstopologien gewählt (**Tab. 1-1**). Fahrzeuge mit Verbrennungsmotorantrieb (ICV) werden als Referenzfall betrachtet. Hybridantriebe mit Verbrennungsmotoren (HEV) werden als Parallelhybride (*Parallel hybrid electric vehicle*, PAH) analysiert. Bei diesem Konzept sind die Drehzahlen der Antriebsmaschinen durch die Übersetzung des Getriebes festgelegt. Die durch die optimierende Betriebsstrategie gesteuerte Variation des Betriebspunkts des Verbrennungsmotors erfolgt durch Überlagerung des Drehmoments der Elektromaschine.

Zu analysierende voll-elektrische Konzepte sind Pkw mit Brennstoffzellen (FCV) und mit Batterie (BEV). FCV werden hier als Hybridfahrzeuge definiert, da sie über eine Batterie verfügen, die eine Rückgewinnung von Bremsenergie ermöglicht und in wirkungsgradungünstigen Betriebsbereichen des Brennstoffzellensystems Antriebsleistung zur Verfügung stellen kann.

Als Verbrennungsmotoren kommen Otto- und Dieselmotoren zum Einsatz, um auch zwischen deren unterschiedlichen Betriebscharakteristiken und Wirkungsgraden unterscheiden zu können. Für die Bereitstellung elektrischer Leistung werden folgende Optionen berücksichtigt:










- konventionelle Lichtmaschinen in Verbindung mit Starterbatterien,

- elektrische Maschinen für Motor- und Generatorbetrieb zur Einbindung größerer elektrischer Leistungen in den Fahrtrieb,
- Batterien als Hybridkomponente,
- Batterien zur Nachladung über externe Stromnetze,
- Brennstoffzellensysteme zur Versorgung von Antrieb und Bordnetz.

Die verwendete Symbolik ist in leicht abgewandelter Form von Isermann (2008) übernommen worden [7].

Tab. 1-1: Pkw-Konzepte und Antriebstopologien.

Die Piktogramme der Antriebstopologien enthalten nur die Hauptenergieflüsse des Antriebs; Nebenverbraucher wurden hier vernachlässigt. Die vollständigen Schemata sind den Abschnitten 4.2 bis 4.5 zu entnehmen.
 α_H : Hybridisierungsgrad, Verhältnis der Leistung des Primär- zu der des Sekundärwandlers; **FCV**: Pkw mit Brennstoffzellen im Direktwasserstoffbetrieb.

Konzept	Erläuterung	Piktogramm der Antriebstopologie
ICV-G ICV-D	Pkw mit Verbrennungsmotor (<i>Internal combustion engine vehicle</i>) G: Benzin (<i>Gasoline</i>); D: Diesel	
PAH-G PAH-D	Parallelhybrid-Pkw mit Verbrennungsmotor und Batterie (Momentenaddition)	
BEV	Elektro-Pkw mit Batterie (<i>Battery electric vehicle</i>)	
FCV	Elektro-Pkw mit Brennstoffzellen und Batterie (<i>Fuel cell electric vehicle</i>)	
Legende  Kraftstoff-tank  Batterie  Verbrennungsm.  Brennstoffzelle  Elektro-motor  Generator  Getriebe  Leistungs-elektronik  Antriebs-energie		

2 Entwicklung des Modellansatzes

Als Analysewerkzeug wird die numerische Simulation von Fahrzeugantrieben zur Kraftstoffverbrauchsanalyse eingesetzt. Im Folgenden wird zunächst ein Überblick über in der Literatur dokumentierte Simulationsmodelle gegeben, um anschließend den im Zusammenhang mit der Aufgabenstellung gewählten Modellansatz zu erläutern. Zuvor werden jedoch einige Begriffsbestimmungen als notwendig erachtet.

2.1 Begriffsbestimmungen

In der Literatur werden Begriffe, die im Zusammenhang mit der Themenstellung dieser Arbeit stehen, zum Teil unterschiedlich verwendet. Soweit für das Verständnis dieser Arbeit notwendig, sollen an dieser Stelle solche Begriffe definiert werden.

Betriebsstrategien bestimmen die Auswahl von Betriebsmodi sowie die Steuerung von Leistungsflüssen in hybriden Antriebsstrukturen. Betriebsmodi können zum Beispiel batterieelektrisches oder verbrennungsmotorisches Fahren sein. Eine Steuerung der Leistungsflüsse ist beispielsweise notwendig, wenn Verbrennungsmotorleistung für den Antrieb und zur Versorgung eines Generators zur Batterienachladung benötigt wird. Betriebsstrategien folgen dabei dem Fahrbetrieb übergeordneten Zielsetzungen, wie im Zusammenhang mit dieser Arbeit der Minimierung des Kraftstoffverbrauchs. Eine Klassifizierung von Betriebsstrategien ist im Abschnitt 4.1 zu finden.

Der **differentielle Wirkungsgrad** spielt im Zusammenhang mit der Funktion Lastpunktanhebung (LPA, siehe Unterabschnitt 4.1.1, S. 57) eine zentrale Rolle und ist beispielhaft als $\eta_{diff,VM}$ für den Verbrennungsmotor (VM) als das Verhältnis von zusätzlich erzeugter mechanischer Leistung des Motors zum Kraftstoffmehrverbrauch definiert:

$$\eta_{diff,VM} = \frac{\Delta P_{VM}^m}{\Delta P_{VM}^{ch}} \quad (2-1)$$

In der Diskussion der Ergebnisse dieser Arbeit wird in Abwandlung dieser Gleichung auch der **mittlere differentielle Wirkungsgrad der Stromerzeugung** als Verhältnis von zusätzlich erzeugter elektrischer Energie für das Bordnetz und der Energie des dafür zusätzlich verbrauchten Kraftstoffs definiert:

$$\bar{\eta}_{diff}^e = \frac{\Delta E_{BN}^e}{\Delta E_{VM}^{ch}} \quad (2-2)$$

Typisch für **dynamische Modelle**, die häufig auch als vorwärtsdynamische Modelle bezeichnet werden, ist die Anwendung numerischer Lösungsverfahren, die – im Kontext dieser Arbeit – der Berechnung von Bewegungsänderungen als Folge der Wirkung von Kräften oder Momenten dienen. Der Begriff **dynamisches Antriebsstrangmodell** wird in dieser Arbeit für dasjenige Teilmodell der hier entwickelten Simulationsmodelle verwendet, das als

dynamisches Modell (s.o.) die Fahrgeschwindigkeit als Funktion des Getriebeeingangsmoments errechnet.

Der **Fahrzustand** wird durch Fahrgeschwindigkeit und Antriebsmoment definiert. Außer beim Anfahren lassen sich aus der Fahrgeschwindigkeit, abhängig von den möglichen Getriebeübersetzungen, die möglichen Maschinendrehzahlen ermitteln. Das Antriebsmoment wird durch die Betriebsgrenzen des Antriebs und die Grenzen der Kraftübertragung zwischen Rad und Straße limitiert.

Hybridkonzepte sind solche Pkw-Konzepte, die über mehr als einen Energiewandler – einschließlich eines für diesen bestimmten Energiespeichers – für den Fahrtrieb verfügen. Die in der Literatur gebräuchliche Abkürzung HEV (*Hybrid-electric vehicle*) gilt für parallele, serielle oder leistungsverzweigende Hybride mit Verbrennungsmotor. PHEV (*Plug-in hybrid electric vehicle*) erweitern die Funktionalität von HEV um batterieelektrisches Fahren unter Nutzung von Strom aus externen Stromnetzen. In dieser Arbeit wird zur Spezifizierung von HEV die Abkürzung PAH für parallele Hybride verwendet.

Ein **Lastkollektiv** bezeichnet die Gesamtheit der für ein Pkw-Nutzungsprofil beziehungsweise für einen Fahrzyklus auftretenden Betriebszustände von Antriebsmaschinen.

Als **Motorkennung** wird der Verlauf des maximalen Motormoments von Antriebsmaschinen in Abhängigkeit von der Drehgeschwindigkeit bezeichnet ($M_{AM,max} = f(\omega_{VM})$). [8, S. 86]

Pkw-Segmente beziehungsweise Fahrzeugsegmente beschreiben eine Zugehörigkeit von Pkw zu technischen oder marktspezifischen Merkmalen von Pkw. Entsprechende Klassifizierungen werden beispielsweise von der Europäischen Kommission [9] oder vom Kraftfahrtbundesamt [10] vorgenommen. Der Begriff **Fahrzeugklasse** wird in dieser Arbeit mit gleicher Bedeutung verwendet.

Bei **quasistatischen Modellen** werden die für eine geforderte Änderung von Bewegungen notwendigen Kräfte oder Momente bestimmt. Diese Modelle werden auch als invers-dynamische Modelle bezeichnet und häufig für vereinfachte Energiebedarfsanalysen genutzt. Für die Untersuchung komplexerer Antriebstopologien unter Einbeziehung von Betriebsstrategien sind sie weniger geeignet. Dies betrifft vor allem hybride Antriebsstrukturen.



Als **Routinen** werden in dieser Arbeit als Programmcode vorliegende Abfolgen von Operationen zur Steuerung unterschiedlicher *Software*-Funktionen bezeichnet, die manuell oder automatisiert ausgelöst werden können.







Der Begriff der **Skalierung** wird verwendet, wenn Komponenten von Pkw-Antrieben bezüglich der Leistung, des Energieinhalts oder des Betriebsbereichs angepasst werden, üblicherweise um die Leistungsfähigkeit des Gesamtantriebs in Übereinstimmung mit den Fahrleistungsanforderungen zu gewährleisten.

2.2 Simulationsgestützte Kraftstoffverbrauchsanalyse

Im Zusammenhang mit der simulationsgestützten Kraftstoffverbrauchsanalyse sind in der Literatur zahlreiche Modellentwicklungen und -anwendungen dokumentiert. Einen Überblick der in Verbindung mit der Aufgabenstellung dieser Arbeit als wesentlich erachteten Veröffentlichungen enthält **Tab. 2-1**. Die dort zusammengestellten Angaben machen deutlich, dass für systemanalytische Vergleiche vor allem die Simulationswerkzeuge ADVISOR (*Advanced Vehicle Simulator*) des National Renewable Energy Laboratory (NREL, USA) und PSAT (*Powertrain Systems Analysis Toolkit*) des Argonne National Laboratory (ANL, USA) bereits mehrfach eingesetzt wurden. Für Pkw im Europäischen Kontext spielt ADVISOR eine besondere Rolle, da dieses Werkzeug für den *Tank-to-wheel* Teil der außerordentlich breit angelegten *Well-to-wheel* Studie von JRC/EUCAR/CONCAWE, JEC (2008) [11, 12, 13], eingesetzt wurde.

Tab. 2-1: Simulationsgestützte Kraftstoffverbrauchsanalyse – Literaturübersicht.

 für dynamische,  für quasistatische Modelle; Simulationsplattform Matlab/Simulink®, wenn nicht anders angegeben; **ANL**: Argonne National Laboratory (USA); **APU**: *Auxiliary Power Unit*; **EPRI**: Electric Power Research Institute (USA); **FCV**: Brennstoffzellen-Pkw, auch Hybrid (hier nur im Direktwasserstoffbetrieb betrachtet); **FTP**: *Federal Test Procedure*; **HEV**: Hybrid-Pkw als paralleler (PAH), serieller (SEH) oder *Power-split* (PSH) Hybrid; **HWFET**: *Highway Fuel Economy Test*; **ICV**: Pkw mit Verbrennungsmotor; **NREL**: National Renewable Energy Laboratory (USA); **PHEV**: *Plug-in* HEV.

Bezeichnung	Entwickler	Anwendung/ Pkw-Konzepte
ADVISOR [14]	 NREL (USA)	<ul style="list-style-type: none"> Vergleichende Analyse von BEV, FCV, HEV, PHEV für 2030 [15] Vergleichende Analyse von FCV, HEV (PAH), ICV [16], [11] für 2010
FCVsim	 Univ. of Hawaii (USA)/ xcellvision (DE)	FCV [17]
LFM	 EPRI (USA)/ Univ. of Delaware (USA)	FCV (Bus) [18]
PSAT	 ANL (USA)	<ul style="list-style-type: none"> Vergleichende Analyse von FCV und ICV [19] Batterieeinsatz in PHEV [20, 21] HEV- und PHEV-Modellvalidierung [22] Steuerungsalgorithmen für HEV und PHEV [23, 24]
k.A.	 FZJ (DE)	<ul style="list-style-type: none"> Vergleichende Analyse von FCV, ICV [25] Vergleichende Analyse von BEV, FCV [26] Analyse von APU für ICV [27] Plattform: AVL CRUISE/ Simulink kombiniert [26, 27]
k.A. [28]	 Politecnico di Milano	<ul style="list-style-type: none"> Vergleichende Analyse von BEV und FCV Plattform nicht spezifiziert Konstante Wirkungsgrade von Antriebskomponenten

Wie aus **Tab. 2-1** hervorgeht, wurden Brennstoffzellenfahrzeuge im Direktwasserstoffbetrieb, Hybridfahrzeuge und Verbrennungsmotorfahrzeuge analysiert. Darüber hinaus, allerdings im nordamerikanischen Kontext, ist die Veröffentlichung von Kromer et al. (2008) hervorzuhe-

ben. Hier ist das Verbrauchsreduktionspotential von BEV, FCV, HEV und PHEV mit dem Zeithorizont 2030 analysiert worden.

Die Mehrzahl der Modellentwicklungen laut **Tab. 2-1** verwendet dynamische Modelle, was insbesondere mit Vorteilen bei der Entwicklung beziehungsweise Umsetzung von Regelstrategien im Fahrzeuggesamtmodell zusammenhängt. Nachteile bezüglich der Simulationssgeschwindigkeit können mit dem heutigen Stand der Computertechnik als eher gering eingeschätzt werden. Das Simulationswerkzeug ADVISOR nutzt dennoch auch quasi-statische Modelle, deren Anwendung jedoch auf die Skalierung der Antriebskomponenten beschränkt ist.

Auch die Art der Komponentenmodellierung wird weitgehend übereinstimmend gewählt. Zur Anwendung kommen kennfeldbasierte Modelle der Antriebsmaschinen, sowie von Brennstoffzellen und teilweise auch von Batterien. Längsdynamische Fahrzeugmodelle bilden die Grundlage der Bestimmung von Drehmoment und Drehzahl an der Antriebsachse. Ausgehend von diesen Erkenntnissen wird im folgenden Abschnitt 2.3 der für die Bearbeitung der Aufgabenstellung entwickelte Modellansatz erläutert.

Für in der Literatur verfügbare Analysen wurden zum Teil unterschiedliche Fahrzeugklassen gewählt. Die bereits genannte Studie JEC (2008) [11] bezieht sich ausschließlich auf Pkw der Kompaktklasse. Williamson et al. analysieren in [16] PAH und FCV der Mittelklasse.

Die Anwendung der Modelle stützt sich schließlich auf definierte Lastprofile, die sich üblicherweise auf standardisierte oder eigens entwickelte Fahrzyklen beziehen. In JEC (2008) [11] werden der Europäische Fahrzyklus MVEG und seine Teilzyklen verwendet, während Williamson et al. ihren Vergleich von PAH und FCV in [16] auf die in den USA eingesetzten Testzyklen *Highway Fuel Economy Test* (HWFET) und *Urban Dynamometer-Driving Schedule* (UDDS, gleich dem FTP-72 Fahrzyklus) beziehen. Eine breitere Auswahl trifft Böckl (2008) [29] zur Effizienzoptimierung von PAH mit der Nutzung von HYZEM und MVEG einschließlich einer Variante zur Erzielung eines dynamischeren Fahrprofils, sowie des dort definierten Braunschweig- und Harz-Zyklus und schließlich eines Fahrzyklus, der Fahren im Stau repräsentieren soll.

2.3 Beschreibung des Modellansatzes

Wie in der Zielsetzung dargestellt wurde, werden in dieser Arbeit dynamische Gesamtfahrzeugmodelle als Werkzeug der Analyse des Potentials der Stromnutzung in Pkw entwickelt. Gesamtfahrzeuge werden als Systeme verschiedenartiger, teilweise miteinander gekoppelter Prozesse, betrachtet. Unter Prozessen werden gemäß DIN 66201/ DIN 19226 Umformung, Transport oder Speicherung von Energie oder Materie verstanden (siehe hierzu [30, S. 31]). Die Simulationsmodelle werden als skalierbare dynamische Modelle entwickelt, deren Basis ein längsdynamisches Pkw-Modell (siehe Abschnitt 3.2) darstellt. Zu jedem der für die Ana-

lyse ausgewählten Fahrzeugkonzepte entsprechend Tab. 1-1 (siehe S. 6) wird eine Modellvariante in der *Software*-Umgebung Matlab/Simulink¹ erstellt. Der einheitliche Rahmen der Modellvarianten wird gebildet durch (i) die Definition einheitlicher, Pkw-segmentspezifischer Fahrzeugparameter (i) die Festlegung der mechanischen, elektrischen sowie thermischen Lastprofile und (ii) die Skalierung der Antriebskomponenten mithilfe von Skalierungsroutinen. Diese verwenden eine iterative Anpassung der Leistung von Antriebskomponenten mit dem Ziel der Einhaltung der vorgegebenen Fahrleistungsanforderungen Höchstgeschwindigkeit, Beschleunigungsfähigkeit und Reichweite. Die Abhängigkeit der Masse der Komponenten von der Skalierung wird bei Energiewandlern mithilfe der spezifischen Leistung P_{spez} mit der Einheit $[kW\ kg^{-1}]$ und bei Energiespeichern mithilfe der spezifischen Energie E_{spez} mit der Einheit $[MJ\ kg^{-1}]$ berücksichtigt, so dass in jedem Iterationsschritt auch die Fahrzeugmasse neu bestimmt wird. Überlastfähigkeiten der Komponenten werden nicht gesondert berücksichtigt.

Da das mechanische Lastprofil über die Rückkopplung mit der Fahrzeuggeschwindigkeit in besonderem Maße mit Steuerungsfunktionen des Antriebssystems verbunden ist, bildet dieses als physikalisches Rad-Straßmodell einen integralen Bestandteil aller Modellvarianten (siehe Abschnitt 3.1). Das elektrische Lastprofil wird auf der Basis einer konzeptspezifischen Auswahl elektrischer Verbraucher im Bordnetz ermittelt. Notwendige Parameter sind Einschalthäufigkeiten und Einschalt Dauern der Nebenverbraucher, die durch zeitabhängige Rechteckprofile repräsentiert werden. Heiz- oder Kühlleistungen werden mithilfe eines thermischen Innenraummodells ermittelt. Zur Deckung der Heizleistung werden verfügbare Wärmemengen der Antriebskomponenten berücksichtigt. Kühlleistung wird ausschließlich mithilfe eines elektrisch betriebenen Klimageräts bereitgestellt.

In Abgrenzung zu den zuvor erläuterten, in der Literatur vorhandenen Modellansätzen (siehe Abschnitt 2.2) besteht die besondere Herausforderung der Gestaltung der Modellvarianten darin, einerseits eine der Aufgabenstellung entsprechend genügend große Detailtiefe zu wählen und ausreichend Freiheitsgrade zur Potentialermittlung zu lassen. Andererseits müssen sowohl der Prozess der Modellentwicklung als auch die Modellanwendung im Sinne der tatsächlichen Simulationsdurchläufe in einem nach Zeit und Aufwand vertretbaren Rahmen gehalten werden. Bezogen auf die hier erstellten Komponentenmodelle bedeutet dies mit dem Ziel der Vereinfachung der Modelle den Einsatz von Kennlinien- und Kennfeldmodellen thermischer und elektrischer Maschinen.

Darüber hinaus erfordern sowohl die Skalierung der Triebstrangkomponenten als auch die im Rahmen der Modellanwendung notwendigen Parametervariationen die Möglichkeit einer automatisierten Parametrierung der Modelle. Dies wird zum einen durch eine hierarchische Strukturierung der einzusetzenden Modellparameter erreicht. Zum anderen werden Parameterdefinition, Simulationsdurchlauf und Ergebnisselektion mithilfe ausführbarer Dateien

¹ Matlab in der Version 7.13 und Simulink in der Version 7.8 (R2011b)

gesteuert, die sich mit geringem Aufwand an die jeweilige Simulationsaufgabe anpassen lassen.

Betriebsstrategien werden mit der Zielstellung der Optimierung des Energieeinsatzes entwickelt und vernachlässigen Kriterien, die die Fahrbarkeit oder den Fahreindruck eines realen Antriebs betreffen. Möglichkeiten der Verbrauchssenkung durch vorausschauende Betriebsstrategien werden nicht betrachtet.

Zur Charakterisierung der entwickelten Modellvarianten wird jeweils eine Modellplausibilisierung vorgenommen, die sich auf die Analyse von Energieströmen, Wirkungsgraden und Betriebsbereichen von Komponenten stützt. Die Bewertung und damit die Ableitung des Potentials der verstärkten Stromnutzung in Pkw-Antrieben erfolgt anhand des Vergleichs der Simulationsergebnisse untereinander. Eine Modellvalidierung mithilfe realer Pkw kann nicht vorgenommen werden, da eine experimentelle Überprüfung im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich ist. Es kann davon ausgegangen werden, dass ermittelte Verbrauchsvor- oder -nachteile im Bereich weniger Prozent im realen Versuch nur schwierig nachzuweisen sind.

3 Spezifizierung der Leistungsbilanzen

Entsprechend der Aufgabenstellung sind folgende Energieformen, die zur Ausführung von Antriebs-, Komfort- und Sicherheitsfunktionen im Pkw bilanziert werden sollen, relevant:

- mechanische Energie für den Antrieb,
- elektrische Energie für das Bordnetz,
- thermische und mechanische Energie für die Fahrzeugklimatisierung.

Thermische und mechanische Energien für Klimatisierungszwecke werden teilweise auf elektrische Energie zurückgeführt. Entsprechend dem Hauptzweck der Pkw-Nutzung ist die Ermittlung der zeitabhängigen Kräfte, die kraftschlüssig zwischen Rad und Straße übertragen werden, der Ausgangspunkt energiebilanzieller Betrachtungen und bildet die Basis der in dieser Arbeit erstellten dynamischen Gesamtfahrzeugmodelle, die in Kapitel 5 beschrieben werden. Dafür ist zunächst die Festlegung von Parametern des Gesamtfahrzeugs erforderlich (Abschnitt 3.1). Notwendige Grundlagen zur Ermittlung von Drehmoment und Drehzahl am Ausgang des Achsantriebs werden im Abschnitt 3.2 erläutert. Abschnitt 3.3 beschreibt die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Skalierung von Antriebskomponenten. Daran anschließend werden die verwendeten Fahrzyklen charakterisiert (Abschnitt 3.4) sowie die antriebsunabhängigen elektrischen und thermischen Leistungsverläufe spezifiziert (Abschnitt 3.5 und 3.6). Schließlich werden in den Abschnitten 3.7 und 3.8 die Optionen der Bereitstellung mechanischer beziehungsweise elektrischer Leistung vorgestellt.

Die hohe Dynamik der Prozesse in Pkw-Antrieben erfordert eine zeitdifferenzierte Betrachtungsweise. Daher stützt sich der Analyseteil der vorliegenden Arbeit überwiegend auf zeitabhängige Leistungsverläufe:

$$P(t) = \frac{dE(t)}{dt} \quad (3-1)$$

Für die Darstellung und Bewertung der Analyseergebnisse werden wiederum Energiemengen als Zeitintegral der Leistung angegeben:

$$E = \int P(t)dt \quad (3-2)$$

Komponentenbezogene Analysen verwenden Wirkungsgrade, die sich als Quotienten der ermittelten Energiemengen errechnen lassen.

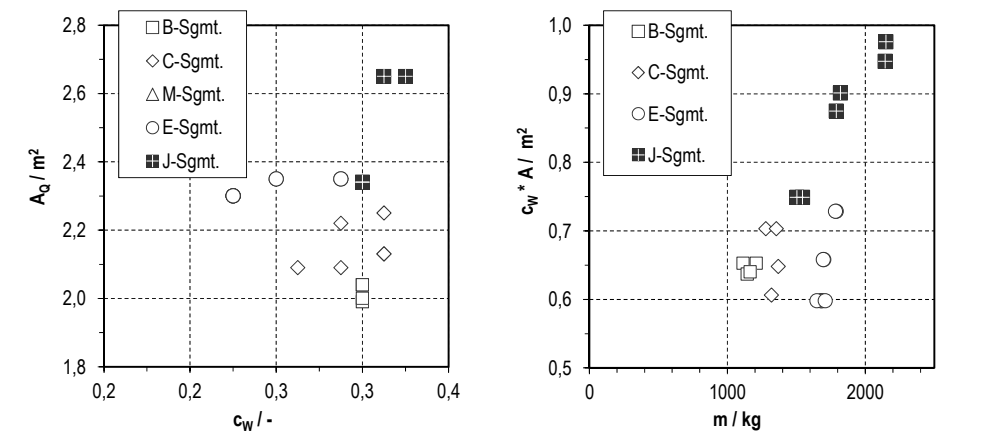
3.1 Festlegung der Fahrzeug- und Antriebsparameter

Ziel des im Rahmen der vorliegenden Arbeit entwickelten Modellansatzes ist die Herstellung der Vergleichbarkeit von Fahrzeugkonzepten mit unterschiedlichen Formen der Bereitstellung und Nutzung elektrischer Energie. Dazu müssen Annahmen teilweise übereinstimmend gewählt werden. Dies betrifft besonders die Definition der für die Energiebilanz notwendigen

Parameter von Basisfahrzeugen: Fahrzeugmasse ohne Antrieb und Speicher, Querspanfläche sowie Luft- und Rollwiderstandsbeiwerte.

Bild 3-1 (links) können Luftwiderstandsbeiwerte c_W und Querspanfläche A_Q von heutigen Pkw unterschiedlicher Fahrzeugklassen entnommen werden. Der rechte Teil von **Bild 3-1** stellt das Produkt aus c_W und A_Q der Fahrzeugmasse gegenüber.

Bild 3-1: Querspanfläche (links) und Luftwiderstandsbeiwerte (rechts) für unterschiedliche Fahrzeugklassen.
Angaben für Serienfahrzeuge mit Basismotorisierung (Stand 2012), eigene Recherche. [31, 32, 33]



In **Tab. 3-1** werden die Basisfahrzeuge für die hier untersuchten Fahrzeugklassen bezüglich der für die Leistungsbilanz relevanten Parameter definiert, auf die sich die weiteren Erläuterungen beziehen. Die Massen der Basisfahrzeuge wurden auf Basis der Angaben zur Fahrzeuggesamtmassse und der mechanischen Nennleistung des Verbrennungsmotors abgeschätzt. Als spezifische Leistung des Motors wurden $0,58 \text{ kW kg}^{-1}$ angesetzt.

Tab. 3-1: Parameter der untersuchten Pkw des A- und C-Segments.
Angaben auf Basis von Mittelwerten aktueller Serienfahrzeuge¹ des A- und C-Segments mit Basismotorisierung. Masse des Basisfahrzeugs gilt ohne Antrieb und Kraftstoffspeicher. [31, 32, 33]

Parameter	Einheit	A-Segment	C-Segment
Masse des Basisfahrzeugs	m_{BFZ} kg	800	1 000
Querspanfläche	A_Q m^2	1,8	2,1
Luftwiderstandsbeiwert	c_W —	0,32	0,32

¹ Werte für die jeweils einfachste Pkw-Ausstattungsvariante mit Basismotorisierung als Ottomotor laut Konfigurationsangeboten deutscher Hersteller.

3.2 Längsdynamisches Modell und Fahrleistungsanforderungen

Im Folgenden soll anhand von Erläuterungen zu den Fahrwiderständen von Pkw die Parametrierung der Zugkraftgleichung als Grundlage der Ermittlung der mechanischen Leistung gemäß Gleichung 3-3 am Rad des Fahrzeugs vorgenommen werden.

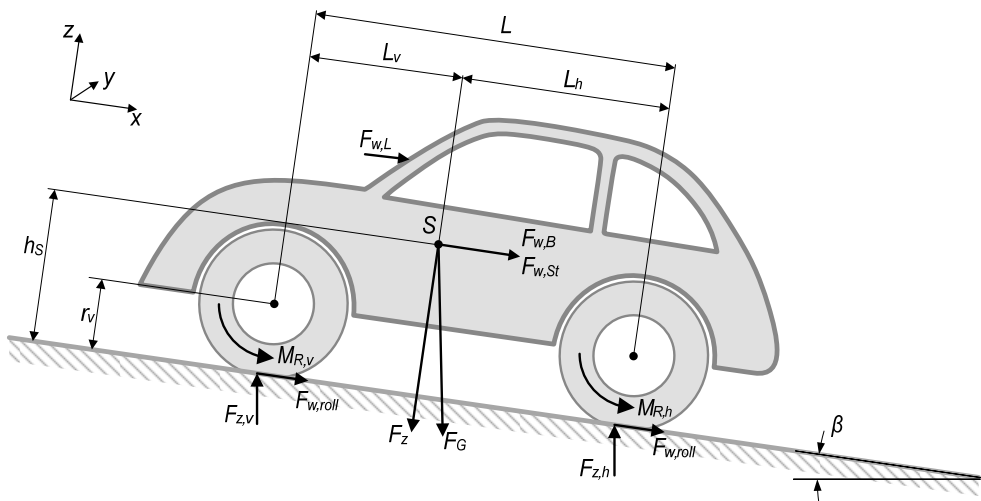
$$P_R^m = M_R \cdot \omega_R = F_R \cdot v \quad (3-3)$$

P_R^m	Mechanische Leistung am Rad des Fahrzeugs
M_R	Radmoment
ω_R	Drehgeschwindigkeit des Rades
F_R	auf die Straße übertragene Kraft
v	Fahrzeuggeschwindigkeit

Bild 3-2 stellt die dafür erforderlichen Dimensionen und Kräfte dar.

Bild 3-2: Kräfte am Fahrzeug.

S: Schwerpunkt; Quellen: eigene Darstellung nach [34, S. 324], [35], [36]



Da auch bei Bergauffahrt die Fahrwiderstände in hier ausschließlich betrachteter Fahrzeuglängsrichtung – in Richtung der x-Achse – wirken, wird ein fahrzeugfestes Koordinatensystem gewählt. Es werden konzentrierte Parameter angenommen, so dass Kräfte beim Beschleunigen und bei Steigungsfahrt auf den Schwerpunkt S des Fahrzeugs bezogen werden. Bezüglich der Antriebsart wird ausschließlich Frontantrieb berücksichtigt. Der Fahrzeugzustand ist durch Fahrgeschwindigkeit und Antriebsdrehmoment bestimmt, so dass sich bei gegebener Achs- und Getriebeübersetzung sowie unter Einbeziehung der Drehmomentverluste der Kraftübertragung die Betriebszustände der Antriebsmaschine ermitteln lassen.

Für die an dieser Stelle notwendigen Erläuterungen wird ein frontgetriebener Mittelklasse-Pkw aus dem C-Segment mit Ottomotor als Referenz-Pkw (ICV) definiert (siehe Bild 4-3, S. 65). Die Spezifikationen in **Tab. 3-2** ergänzen die Angaben laut Tab. 3-1.

Tab. 3-2: Fahrzeugdaten des Referenz-Pkw mit Ottomotor (ICV-G) im Szenario „Standard“.

Querspanntflächen und Luftwiderstandsbeiwerte als Mittelwerte aktueller Pkw des C-Segments deutscher Hersteller; Leermasse und Motorleistung beziehungsweise Nenndrehmoment auf Basis der dynamischen Simulation für das Szenario „Standard“, siehe Abschnitt 6.1; weitere Parameter als Annahmen für Pkw mit Frontantrieb, 6-Ganggetriebe und Ottomotor.

Parameter		Einheit	A-Segment	C-Segment
Leermasse	m_F	kg	996	1251
Querspanntfläche	A_Q	m ²	1,8	2,1
Luftwiderstandsbeiwert	c_W	–	0,32	0,32
Rollwiderstandsbeiwert	f_{roll}	–	$f(v)$ [36]	
Radstand Abstand von S, vorn	L L_v	m	2400 800	2600 870
Schwerpunkthöhe	h_s	m	0,500	0,500
Statischer Rollradius	r_v ; r_h	m	0,289	0,289
Dynamischer Rollradius	R_0	m	0,308	0,308
Wirkungsgrad des Triebstrangs	η_T	–	$f(i_{GT,i})$	
Festübersetzung	i_{AT}	–	$f(\beta_{max}, v_{max})$	
Übersetzung der Gänge 1–6	$i_{GT,i}$	–	$f(\beta_{max}, v_{max})$	
Nominales Motormoment	M_{nom}	Nm	159	211
Nominale Motorleistung	P_{nom}	kW	70	93
Auftriebsbeiwert vorn	$c_{z,v}$	–	0,100	0,100

Nach Mitschke et al. (2004) [36, S. 67f] lässt sich aus dem Schwerpunktsatz der technischen Mechanik und aus dem auf die angetriebene Fahrzeugachse bezogenen Momentensatz die Zugkraftgleichung als Summe aller Antriebsmomente bezogen auf den Rollradius angeben:

$$Z = \sum \frac{M_{R,v}}{r_v} = \sum F_{w,i} = F_{w,R} + F_{w,L} + F_{w,B} + F_{w,St} \quad (3-4)$$

Die Summanden auf der rechten Seite werden als die im Folgenden zu spezifizierenden Fahrwiderstände $F_{w,i}$ bezeichnet. Dies sind im Einzelnen die:

- Radwiderstandskraft mit der vereinfachenden Annahme $F_{w,R} \approx F_{w,roll}$ als Funktion des dimensionslosen Rollwiderstandsbeiwerts f_{roll} und der Radlast F_z .
- Luftwiderstandskraft $F_{w,L}$ als Funktion der Querspanntfläche A_Q , des dimensionslosen Luftwiderstandsbeiwerts c_W , der Luftdichte ρ_L und der Fahrgeschwindigkeit v ,
- Beschleunigungskraft $F_{w,B}$ als translatorische Beschleunigungskraft multipliziert mit dem Drehmassenzuschlagfaktor λ ,
- Steigungswiderstandskraft $F_{w,St}$ als Funktion der Fahrzeugmasse m_F und des Steigungswinkels β_{St} ,

Daraus ergibt sich die Gleichung für die Zugkraft Z in der für die weitere Analyse gewählten Form:

$$Z = \frac{M_{R,v}}{r_v} = m_F \cdot \lambda \cdot a_x + m_F \cdot g \cdot (\cos \beta_{St} \cdot f_{roll}(v) + \sin \beta_{St}) + c_W \cdot A_Q \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot v^2 \quad (3-5)$$

$M_{R,v}$ Achsmoment der angetriebenen Vorderachse

a_x Beschleunigung in x-Richtung

Im Simulationsmodell wird in Abwandlung von Gleichung 3-5 die Integralform verwendet. Diese hat – im Sinne der dynamischen Modellierung – die Fahrzeuggeschwindigkeit v als Funktion des zeitabhängigen Radmoments M_R zum Ergebnis.

$$v = \int \frac{\frac{M_R}{r_v} - m_F \cdot g \cdot (\cos \beta_{St} \cdot f_{roll}(v) + \sin \beta_{St}) - c_W \cdot A_Q \cdot \frac{\rho_L}{2} \cdot v^2}{m_F \cdot \lambda} dt \quad (3-6)$$

Wie weiter oben dargestellt, wird vereinfachend $F_{w,R} \approx F_{w,roll}$ angenommen [36, S. 15]. Der Einfluss von Restbremsmoment der Bremsen, Lagerreibung, Vorspurwiderstand, Krümmungswiderstand bei Kurvenfahrt sowie Fahrbahnebenheiten werden nicht berücksichtigt.

Der dimensionslose Rollwiderstandsbeiwert f_{roll} ist geschwindigkeitsabhängig und liegt für schlauchlose Reifen je nach Hersteller und Reifenart bei Fahrgeschwindigkeiten bis 100 km h^{-1} zwischen 0,008 und 0,015. Bei 160 km h^{-1} werden für Reifen im Geschwindigkeitsbereich bis 180 km h^{-1} 0,028 und für Reifen, die für darüber liegende Geschwindigkeiten geeignet sind, Werte bis 0,015 angegeben [36, S. 10]. In dieser Arbeit wird für f_{roll} der folgende empirische Ansatz gewählt, der nach Anpassung der Parameter entsprechend [37, S. 29] in guter Übereinstimmung mit neueren Daten in [36, S. 10] ist:

$$f_{roll}(v) = \begin{cases} f_{roll,0} + f_{roll,1} \cdot v + f_{roll,2} \cdot v^4, & v > 0 \\ 0, & v = 0 \end{cases} \quad (3-7)$$

Die Konstanten werden wie folgt definiert:

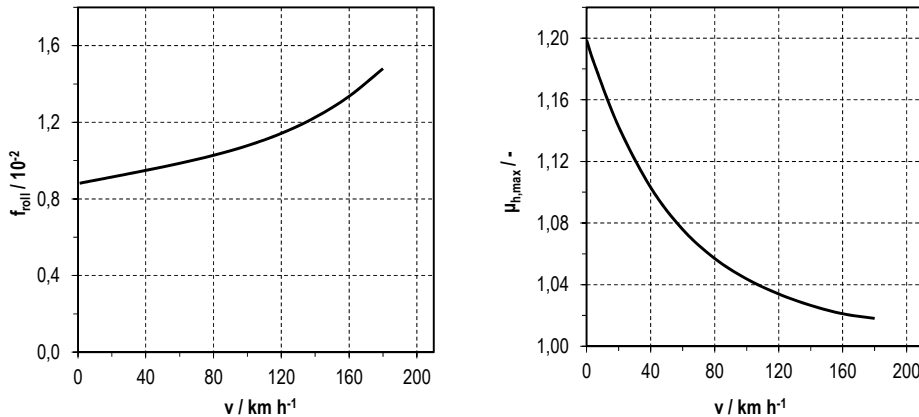
$$f_{roll,0} = 8,8 \cdot 10^{-3}; f_{roll,1} = 1,7 \cdot 10^{-5}; f_{roll,2} = 2,8 \cdot 10^{-10}$$

Die Geschwindigkeit v geht mit der Einheit $[\text{km h}^{-1}]$ ein. **Bild 3-3** (links) zeigt den mithilfe von Gleichung 3-7 ermittelten Verlauf von f_{roll} über der Geschwindigkeit.

Bild 3-3: Geschwindigkeitsabhängige Kennwerte von Pkw-Reifen.

Links: Rollwiderstandsbeiwert (nach [36, 37]). Parameter siehe Text.

Rechts: Maximaler Haftbeiwert (nach [36, S. 21]), extrapoliert auf den dargestellten Bereich von v .



Mit dem Hinweis auf die später erläuterte Bestimmung der Leistungsklassen von Pkw unter Anwendung gegebener Fahrleistungsanforderungen soll an dieser Stelle noch auf die Bestimmung der Fahrgrenzen, also der Grenzen der Kraftübertragung vom Rad auf die Straße eingegangen werden. Mit steigendem Drehmoment beginnt der Reifen nach Überschreiten der maximal übertragbaren Kraft am Umfang des Reifens bei dann reduzierter Kraftübertragung [36, S. 16] zu rutschen. Die am Rad verfügbare Kraft wird daher bei der weiteren Analyse auf die maximal übertragbare Umfangskraft $F_{x,u,max}$ gemäß Gleichung 3-8 begrenzt.

$$F_{x,u,max} = \mu_{H,max} \cdot F_{z,v} \quad (3-8)$$

Für das später erläuterte Simulationsmodell wird die Abhängigkeit des maximalen Haftbeiwertes $\mu_{H,max}$ von der Fahrgeschwindigkeit gemäß [36, S. 21] berücksichtigt (siehe **Bild 3-3** (rechts)).

Die Achslast ist in der Gleichung mit $F_{z,v}$ bereits auf die angetriebene Vorderachse bezogen. Zu deren Ermittlung muss zunächst die statische Achslast $F_{z,v,stat}$, die die Schwerpunktverlagerung bei $\beta \neq 0$ berücksichtigt, ermittelt werden [36, S. 158]:

$$F_{z,v,stat} = m_F \cdot g \cdot \left(\frac{L_h}{L} \cdot \cos \beta_{st} - \frac{h_S}{L} \cdot \sin \beta_{st} \right) \quad (3-9)$$

L	Radstand
L_h	Abstand in x-Richtung zwischen Fahrzeugschwerpunkt und Vorderachse
h_S	Schwerpunkthöhe.

Mit Gleichung 3-10 lässt sich dann die vordere Achslast bestimmen:

$$F_{z,v} = F_{z,v,stat} - F_{L,z,v} - m \cdot \left[\frac{h_S}{L} + (\lambda^* - 1) \cdot \frac{r_v}{L} \right] a_x \quad (3-10)$$

Die durch den Luftwiderstand erzeugte Auftriebskraft an der Vorderachse $F_{L,z,v}$ wird nach Gleichung 3-11 errechnet:

$$F_{L,z,v} = c_{z,v} \cdot A_Q \cdot \frac{\rho_L}{2} v^2 \quad (3-11)$$

Der Auftriebsbeiwert $c_{z,v}$ wird unter Zuhilfenahme der Abbildung 16.2 in [36, S. 60] mit 0,1 angesetzt. Der Drehmassenzuschlagfaktor λ^* berücksichtigt abweichend von der Definition für Gleichung 3-13 nur Drehmassen, die um die Querachse des Fahrzeugs rotieren und damit ein Drehmoment auf die hier betrachtete Vorderachse erzeugen. Da die Betrachtung auf Fahrzeuge mit Frontantrieb und quereingebautem Motor reduziert ist, kann aber $\lambda^* = \lambda$ angenommen werden.

Für Querspanfläche und Luftwiderstandsbeiwert gelten heute Werte entsprechend Bild 3-1. Die Luftdichte beträgt für Umgebungsbedingungen, wie sie in [38, S. 83] mit einer Temperatur von 15°C und einem Luftdruck von 100 kPa festgelegt sind, $1,184 \text{ kg m}^{-3}$ [39]. Es wird vereinfachend angenommen, dass der Betrag der Anströmgeschwindigkeit gleich der Fahrgeschwindigkeit und der Luftwiderstandsbeiwert c_W gleich dem Luftwiderstandsbeiwert in x-Richtung c_x ist.

Für die Ermittlung der Beschleunigungskraft sind rotierende Massen gesondert zu berücksichtigen. Zu diesen zählen Räder, Bremsen, Antriebs- und Getriebewellen sowie rotierende Triebwerksteile. Zur Vereinfachung der Berechnung werden sogenannte Drehmassenzuschlagfaktoren verwendet. Mitschke et al. (2006) geben in [36, S. 74] entsprechende Werte in einem Bereich zwischen 1,05 und 1,50 abhängig vom Übersetzungsverhältnis von Kennungswandlern in Diagrammform an. Die Drehmassenzuschlagfaktoren werden in dieser Arbeit mithilfe der Berechnung des Ersatzträgheitsmoments für jedes Antriebskonzept ermittelt. Die dazu in [36, S. 73] für zweiachsige Fahrzeuge mit Stufengetriebe und Hinterachsantrieb angegebene Gleichung für J^* wird auf den hier angenommenen Frontantrieb angepasst und lautet dann:

$$J_{R,v}^* = J_{R,h} + J_{R,v} + i_A^2 \cdot J_A + i_A^2 \cdot i_G^2 \cdot J_{VM} \quad (3-12)$$

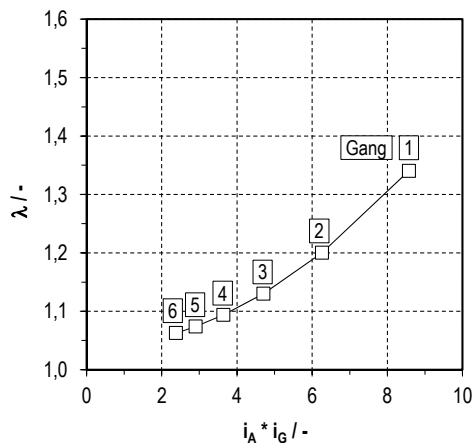
Dabei sind i_A und i_G die Übersetzungsverhältnisse von Achsantrieb und Getriebe sowie J_A und J_{VM} die Trägheitsmomente der Antriebsteile und des Verbrennungsmotors. $J_{R,v}$ und $J_{R,h}$ bezeichnen die Trägheitsmomente der Vorder- beziehungsweise Hinterräder inklusive der Bremsscheiben. Die Drehmassenzuschlagfaktoren werden spezifisch für die jeweilige Übersetzungsstufe unter Anwendung von Gleichung 3-13 und bezogen auf die angetriebene Vorderachse ermittelt.

$$\lambda = 1 + \frac{J_{R,v}^*}{r_v \cdot R_v \cdot m_F} \quad (3-13)$$

Bild 3-4 zeigt die aus dem Ersatzträgheitsmoment errechneten dimensionslosen Drehmassenzuschlagfaktoren für das Referenzfahrzeug. Erläuterungen zum Getriebe des Referenz-Pkw sind weiter unten in diesem Abschnitt zu finden.

Bild 3-4: Berechnete Drehmassenzuschlagfaktoren für den Referenz-Pkw.

Berücksichtigt sind (Schätzwerte für Trägheitsmomente in Klammern): Räder ($3,8 \text{ kg m}^2$), Bremsscheiben ($0,51 \text{ kg m}^2$, vorn und $0,22 \text{ kg m}^2$ hinten), Kupplung ($0,20 \text{ kg m}^2$) und Schwungrad ($0,50 \text{ kg m}^2$)



Beispielhafte Zugkraftkennlinien für den Referenz-Pkw sind **Bild 3-5** zu entnehmen. Erforderliche Parameter können der Bildunterschrift entnommen werden. Aus **Bild 3-5** (links) gehen die zur Überwindung von Roll- und Luftwiderstandskraft erforderlichen Kräfte hervor.

Bild 3-5: Zugkraftkennlinien des Referenz-Pkw.

Links: F_{roll} und $F_{roll} + F_L$

Rechts: für unterschiedliche Beschleunigungs- (a_x) und Steigungswerte (β_{St}).

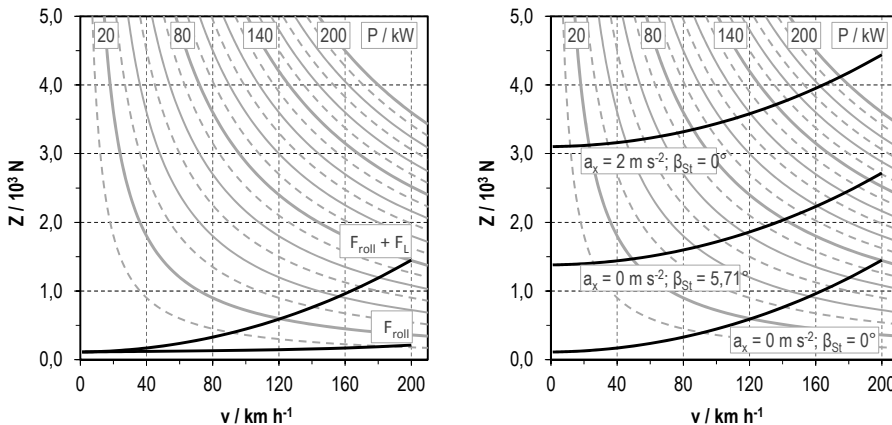


Bild 3-5 (rechts) zeigt die Zugkraftkennlinie für das Fahren bei konstanter Geschwindigkeit, bei konstanter Beschleunigung von 2 m s^{-2} und bei einer Steigung von 10 %, entsprechend einem Steigungswinkel von $\beta_{St} = 5,71^\circ$. Die Schnittpunkte mit den Isolinen der Leistung lassen den Leistungsbedarf für ausgewählte Fahrzustände erkennen. Bei einer konstanten Geschwindigkeit von 120 km h^{-1} auf ebener Straße ist demnach eine Leistung von etwa 20 kW erforderlich. Bei Bergauffahrt mit einer Steigung von 10 % mit gleicher Geschwindigkeit beträgt die benötigte Leistung etwa 60 kW . Wird bei einer Geschwindigkeit von 120 km h^{-1} mit 2 m s^{-2} ($7,2 \text{ km h}^{-1} \text{ s}^{-1}$) beschleunigt, sind etwa 120 kW notwendig.

3.3 Skalierung des Antriebs

Die Skalierung der Antriebskomponenten wird unter Anwendung gegebener Fahrleistungsanforderungen (**Tab. 3-3**) vorgenommen. $F_{w,L}$, $F_{w,R}$ und $F_{w,St}$ sind durch Fahrgeschwindigkeit und Steigung bestimmt.

Die Möglichkeiten zur Deckung des Leistungsbedarfs am Rad sind neben der bereits beschriebenen Grenze der Kraftübertragung des Rad-Straßmodells von der Skalierung der Antriebskomponenten und der Charakteristik der Kraftübertragung abhängig. Zur Kraftübertragung gehören Getriebe und Achsantrieb, die – bezogen auf ICV – der Anpassung der Verbrennungsmotorkennung an den Leistungsbedarf des Fahrbetriebs dienen. Dadurch soll zum einen ein möglichst großer Bereich des durch die ideale Leistungshyperbel begrenzten Zugkraft-Geschwindigkeitsdiagramms erschlossen werden, vgl. **Bild 3-5**. Zum anderen ist

die Wahl der Gangstufenzahl und der Übersetzungen von Getrieben mitentscheidend für den im Betrieb genutzten Kennfeldbereich und damit für den Kraftstoffverbrauch (siehe hierzu [40, S. 102]). Maßgeblich für die hier vorgenommene Skalierung der Antriebsmaschine sind Steigvermögen und Höchstgeschwindigkeit.

Tab. 3-3: Fahrleistungsanforderungen für Pkw des A- und C-Segments zur Skalierung der Antriebskomponenten.

BEV-Reichweite für Standardbordnetzlast ohne Heizung und Kühlung;

$\beta_{St,max}$ entspricht einer maximalen Steigung von 50 %.

Parameter	Einheit	A-Segment	C-Segment
Höchstgeschwindigkeit v_{max}	$km\ h^{-1}$	160	180
Höchstgeschwindigkeit v_{max} für BEV	$km\ h^{-1}$	130	160
Beschleunigungsfähigkeit $t_{0 100}$	s	12	11
Reichweite für BEV	km	150	150
Maximaler Steigungswinkel $\beta_{St,max}$	$^{\circ}$	26,6	26,6

Die Ganganzahl wird mit $z = 6$ festgelegt. Die Wahl der Übersetzungen i_n berücksichtigt maximale Geschwindigkeit und Steigfähigkeit. Mithilfe von Gleichung 3-14 wird die maximale Übersetzung in Abhängigkeit des maximalen Steigungswinkels $\beta_{St,max}$ errechnet:

$$i_{A,max} = \frac{r_v \cdot m_F \cdot g \cdot (f_R \cdot \cos \beta_{St,max} + \sin \beta_{St,max})}{M_{max} \cdot \eta_{ges}} \quad (3-14)$$

Als hier verwendeter Skalierungsansatz wird eine Steigfähigkeit von 50 % entsprechend einem Steigungswinkel $\beta_{St,max}$ von 26,6° angenommen. Der fünfte Gang wird als direkter Gang ausgeführt, so dass sich daraus mit der Annahme, dass die Höchstgeschwindigkeit bei Motornendrehzahl erreicht wird, die Getriebestufen in geometrischer Auslegung ermitteln lassen. Getriebeverluste werden als Drehmomentverluste proportional zum übertragenen Drehmoment je Zahnradpaar berücksichtigt (siehe Unterabschnitt 3.7.3). Für den MVEG-Fahrzyklus lassen sich diese Verluste mit 3 % angeben, so dass der resultierende Wirkungsgrad von 97 % im oberen Bereich von Werten aus der Literatur liegt, die in [8, S. 75] für mechanische Fahrzeuggetriebe mit Tauchschmierung mit 93 % bis 98 % angegeben werden. Das hier entwickelte Verfahren der Skalierung von Pkw-Antrieben wird im Abschnitt 5.4 erläutert.

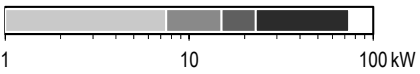

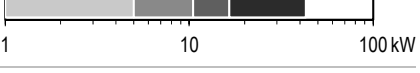
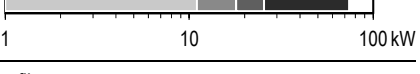
3.4 Festlegung der Fahrzyklen

Mithilfe der zuvor dargestellten Beziehungen werden die Leistungsbilanzen am Rad des Pkw abhängig von der Fahrsituation aufgestellt. Bezogen auf die später erläuterte dynamische Simulation ergeben sich Fahrsituationen aus den zeitabhängig gegebenen Sollwerten der Fahrgeschwindigkeit entsprechend den verwendeten Fahrprofilen. Dabei agiert der Fahrer als Fahrregler, wobei durch Veränderung der Gas- beziehungsweise Bremspedalstellung Änderungen des Fahrzustands initiiert werden. Antriebsleistung wird mithilfe von Verbrennungskraft- oder Elektromaschinen bereitgestellt. Bremsenergie wird durch die mechanische

Betriebsbremse in Wärme umgewandelt oder durch rekuperatives Bremsen (RKB) über einen mechanisch-elektrischen Pfad zur Deckung des elektrischen Bordnetzbedarfs oder zur Ladezustandserhöhung der Batterie verwendet. Die Art der Bereitstellung von Antriebsleistung sowie der Abfuhr der Bremsleistung wird detailliert in den Abschnitten 4.2 bis 4.5 für die untersuchten Pkw-Antriebskonzepte erläutert. Als Beispiele für Fahrprofile werden der HYZEM-Gesamtfahrzyklus und dessen Teilzyklen in **Tab. 3-4** charakterisiert. Insgesamt stehen 25 Fahrzyklen für die Simulation zur Verfügung.

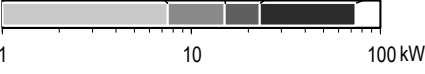
Tab. 3-4: Charakterisierung verwendeter Fahrzyklen.

Der mechanische Energieumsatz ist für positive und negative Zugkräfte angegeben. Die Histogrammauswertungen berücksichtigen nur Leistungsanteile für positive Zugkräfte. Die vollständige Tabelle mit allen zur Verfügung stehenden Fahrzyklen ist in Anhang G zu finden.

Bezeichnung	Mittlere Geschwindigkeit km h^{-1}	Mechanischer Energieumsatz MJ (100km)^{-1}	Kastengrafik des Histogramms der Antriebsleistung
HYZEM	68,4	56,9; -14,6	
HYZEM urban	22,3	51,2; -40,4	
HYZEM rural	47,5	51,4; -27,5	
HYZEM highway	91,9	58,0; -9,6	

Erläuterung zur Kastengrafik:

Quantile: 25% 50% 75% 100%



In **Tab. 3-4** sind neben der mittleren Fahrgeschwindigkeit die mithilfe der dynamischen Simulation für den Referenz-Pkw ermittelten mechanischen Energieumsätze für positive und negative Zugkräfte angegeben. Darüber hinaus enthalten die Kastengrafiken Auswertungen der Histogramme der Antriebsleistungen, die in Intervallen von 0,2 s aufgezeichnet wurden und sich auf den Referenz-Pkw beziehen. Bezogen auf sämtliche verfügbaren Fahrzyklen liegen die Absolutwerte der Energieumsätze für positive Zugkräfte zwischen 36 und 64 MJ (100km)^{-1} und für negative Zugkräfte zwischen -50 und -4 MJ (100 km)^{-1} .

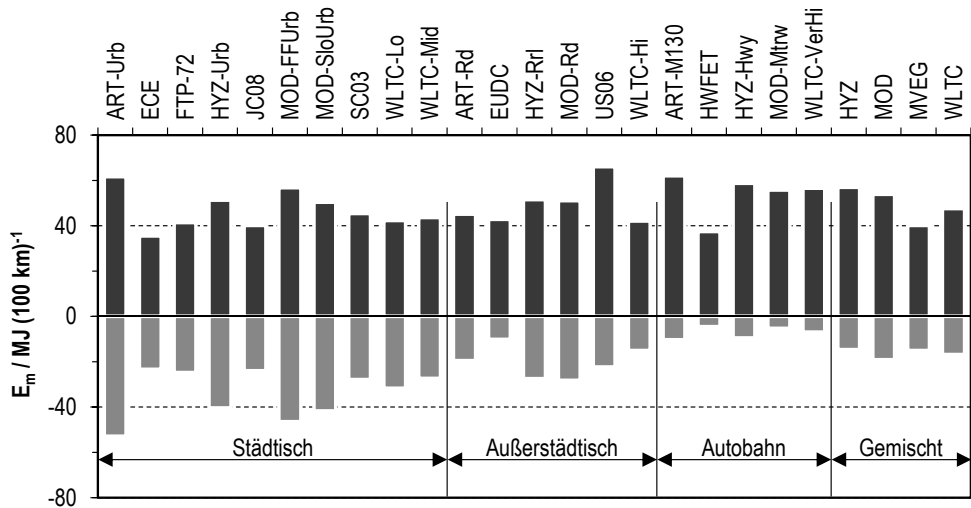
In **Bild 3-6** sind die Werte für die verfügbaren Fahrzyklen dargestellt. Diese sind nach Kategorien entsprechend dem Geschwindigkeitsprofil gruppiert. Die Abbildung macht deutlich, dass städtische Fahrzyklen mit geringen Durchschnittsgeschwindigkeiten nicht zwangsläufig mit niedrigen Energieumsätzen einhergehen. Beispiele sind der *ARTEMIS-Urban* und der *MODEM-Slow urban* Zyklus, die bei Durchschnittsgeschwindigkeiten von 17,7 beziehungs-

weise $13,6 \text{ km h}^{-1}$ Energieumsätze für positive Zugkräfte von $64,1$ beziehungsweise $53,7 \text{ MJ (100km)}^{-1}$ aufweisen. In diesen Fällen sind aufgrund deutlich häufiger auftretender Beschleunigungs- und Verzögerungsvorgänge die Energieumsätze bei negativen Zugkräften und damit auch das Potential zur Bremsenergierückgewinnung erhöht. Die Kastengrafiken (Tab. 3-4 und Anhang G) machen deutlich, dass die Quartile je nach Fahrzyklus sehr unterschiedliche Leistungsbereiche umfassen.

Im Weiteren wird aufgrund der obigen Erläuterungen zu den Fahrzyklen angenommen, dass diese sich aufgrund der Unterschiede in den Fahrsituationen und den resultierenden Lastkollektiven genügend stark voneinander unterscheiden, so dass belastbare Aussagen zum Einfluss des Fahrzyklus auf den Kraftstoffverbrauch möglich sind.

Bild 3-6: Mechanischer Energieumsatz des Referenz-Pkw in den verfügbaren Fahrzyklen.

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM; Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h^{-1}); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban.



3.5 Bordnetz und elektrische Verbraucher

Das Bordnetz versorgt betriebsnotwendige Nebenaggregate sowie Komforteinrichtungen mit elektrischer Energie. Speicher, Energiewandler, Verbraucher und Leitungsnetz sind die wesentlichen Komponenten des Bordnetzes. In heutigen Pkw wandeln Drehstromgeneratoren einen Teil der vom Verbrennungsmotor bereitgestellten mechanischen Energie in elektrische Energie zur Bordnetzversorgung und zur Ladungserhaltung von SLI¹-Batterien um. Der Generator wird über einen Riementrieb vom Verbrennungsmotor angetrieben. Batte-

¹ SLI: Starting, lighting and ignition

rie und Verbraucher sind zum Generator elektrisch parallel geschaltet. Es gilt die Bilanzgleichung¹:

$$I_{Gen} = I_{NV} + I_{Batt} \quad (3-15)$$

I_{Gen}	Generatorstrom
I_{NV}	Gesamtstrom der Nebenverbraucher im Bordnetz
I_{Batt}	Batteriestrom

Bei abgeschaltetem Verbrennungsmotor versorgt die Batterie das Bordnetz und stellt darüber hinaus elektrische Leistung für die Motorstartanlage bereit.

Der zunehmende Bedarf elektrischer Leistung in Pkw-Bordnetzen insgesamt und besonders die steigenden Leistungen einzelner Verbraucher machen veränderte Bordnetzarchitekturen notwendig. Dazu gehören Zwei-Batterie- und Zwei-Spannungsbordnetze. Zwei-Batteriebordnetze sichern die Startfähigkeit von Pkw durch Aufteilung der Batteriefunktionen Startvorgang und Bordnetzversorgung auf zwei Batterien ab. Zwei-Spannungsbordnetze erlauben einerseits die Versorgung von Verbrauchern mit mehreren Kilowatt Leistung bei erhöhter Spannung und ermöglichen andererseits die weitere Nutzung von standardmäßig mit 14 V versorgten Verbrauchern. Als oberes Spannungsniveau solcher Bordnetze wurden zunächst 42 V angestrebt. Aktuell ist ein parallel zum 14 V-Bordnetz² betriebenes 48 V-Bordnetz im Gespräch [41]. Zwei-Spannungsbordnetze sind auch dann notwendig, wenn elektrische Leistungen bei Spannungen von mehreren hundert Volt im Antrieb benötigt werden, wie es für die hier untersuchten hybriden und vollelektrischen Konzepte der Fall ist.

In dieser Arbeit werden Bordnetze nur in ICV als reine 14 V-Bordnetze angenommen, für PAH, FCV und BEV hingegen Zwei-Spannungsbordnetze. Elektromaschinen und Einrichtungen zur Innenraumklimatisierung werden an einem Hochspannungsbordnetz betrieben. Andere Nebenverbraucher werden durch ein 14 V-Bordnetz versorgt, das über einen Gleichspannungswandler mit dem Hochspannungsbordnetz gekoppelt ist. Ein Leistungsmanagement, das anhand einer Priorisierung Verbraucher bei zu hoher Bordnetzlast abschaltet, wird nicht betrachtet. Um den Lastfluss bei FCV möglichst flexibel steuern zu können, sind Brennstoffzellensystem und Hochspannungsbatterie über je einen Gleichspannungswandler mit dem Hochspannungszwischenkreis verbunden. Vergleichbare Bordnetzarchitekturen sind auch in [42, 43, 44] verwendet worden. Die Schaltbilder der in dieser Arbeit angenommenen Bordnetzarchitekturen können **Tab. 3-5** entnommen werden.

Für die energetische Bilanzierung ist die Definition der Wandlungs-, Übertragungs- und Transportprozesse notwendig. Die Prozesskette umfasst in 14 V-Bordnetzen Verbrennungsmotor, Generator beziehungsweise Batterie, Leitungen und Verbraucher. Die Umwandlungsverluste von Verbrennungsmotor und Generator werden abhängig von deren

¹ Die in dieser Arbeit festgelegte Vorzeichenkonvention kann Tab. 5-1, S. 71 entnommen werden.

² Die hier verwendete Bezeichnung orientiert sich an der Generatorspannung von 14 V. Die teilweise benutzte Bezeichnung 12 V-Bordnetz bezieht sich auf die Spannung der heute eingesetzten Bleibatterie von 12 V.

Betriebszustand mithilfe von Betriebskennfeldern beschrieben. Die Nennleistung des Verbrennungsmotors wird mithilfe der Skalierungsroutine bestimmt und die Generatornennleistung mit 3 kW_e festgelegt. Bosch (2003) empfiehlt in [45, S. 1017] für 14 V-Bordnetze je nach Verbrauchertyp maximale Spannungsabfälle für Lichtleitungen, die zwischen 0,6 und 0,9 V liegen. In dieser Arbeit werden die elektrischen Leitungsverluste in 14 V-Bordnetzen mit 5 % und in Hochspannungsbordnetzen mit 1 % angesetzt.

Tab. 3-5: Schaltbilder der Hochspannungs- und 14 V-Bordnetzvarianten.

Erläuterung der Indices: **Batt**: Batterie; **BZS**: Brennstoffzellensystem; **EM**: Elektromaschine; **HS**: Hochspannung; **Ltg**: Leitung; **Zwk**: Zwischenkreis.

Konzeptzuordnung	Schaltbild
14 V-Bordnetz für ICV mit Drehstromgenerator, Gleichrichter und Batterie	
Zweispannungsbordnetz für HEV und BEV mit Hochspannungsbatterie und Gleichspannungswandler für 14 V-Bordnetz	
Zweispannungsbordnetz für FCV mit Brennstoffzellensystem und Hochspannungsbatterie (jeweils mit Gleichspannungswandler für Hochspannungsnetz) und Gleichspannungswandler für 14 V-Bordnetz	

In Hochspannungsbordnetzen kommen Elektromaschinen größerer Leistung zum Einsatz, die einerseits Traktionsleistung bereitstellen, andererseits aber auch als Generator betrieben werden können. Zusätzliche Komponenten sind Gleichspannungswandler deren Verluste entsprechend den Angaben im Unterabschnitt 3.8.3 betriebspunktabhängig mithilfe einer Kennlinie ermittelt werden. Der Nennpunkt des Spannungswandlers wird auf die Nennleistung der versorgten Verbraucher bezogen.

Tab. 3-6: Leistung elektrischer Nebenverbraucher und Charakterisierung der Betriebsdauer.Angaben in [W_e]; Quellen: [45, S. 961, 46, S. 8, 47, S. 288, 48, S. 697, 49, 50, S. 56]**B:** bedarfsgesteuerter Betrieb; **D:** Dauerbetrieb; **N.A.:** nicht anwendbar; **PTC:** *Positive temperature coefficient*; Innenraumklimatisierung siehe Abschnitt 3.6.

Nr.	Verbraucher	ICV	PAH	BEV	FCV	
Antriebsstrang						
1	Motorstartanlage	1900/ 2 s [46]	1900/ 2 s (s. ICV)	N.A.	N.A.	
2	Steuergeräte	200/ D [46]	200/ D (s. ICV)	200/ D (s. ICV)	200/ D (s. ICV)	
3	Kraftstoffversorgung	135/ D [46]	135/ D (s. ICV)	N.A.	135/ B (s. ICV)	
4	Kühlergebläse	500/ B [46]	500/ B (s. ICV)	500/ B (s. ICV)	500/ B (s. ICV)	
5	Kühlwasserpumpe	50/ D [50]	100/ D (s. ICV*)	50/ D (s. ICV)	100/ D (s. ICV*)	
6	Elektromechan. Lenkung	Alle Konzepte: 500/ B**				
Komfort						
7	PTC- Heizelement	N.A.	Alle außer ICV: Bedarfsgesteuert, siehe Abschnitt 3.6			
8	Innenraum-Gebläse	Alle Konzepte: 120/ B				[45]
9	Sitzheizung	Alle Konzepte: 150/ 300 s				[46]
10	Radio/ Navigation	Alle Konzepte: 150/ D				[50]***
Sicherheit						
11	Scheibenwischer v/h	Alle Konzepte: 160/ B (nur FRT, s. Tab. 3-7)				[46]
12	Scheibenheizung v/h	Alle Konzepte: 540/ B (nur FRT, s. Tab. 3-7)				[51]
Beleuchtung						
13	Instrumente	Alle Konzepte: 22/ W				[45]
14	Tagfahrlicht	Alle Konzepte: 12/ D				[48]
15	Abblend-/ Schlusslicht	Alle Konzepte: 140/ B Standardwert, inkl. Kennzeichenbeleuchtung				
16	Fernlicht	Alle Konzepte: 110/ B				Standardwert
17	Bremslicht	Alle Konzepte: 42/ B				Standardwert
18	Blinklicht	Alle Konzepte: 42/ B				Standardwert

* Wert verdoppelt, da zwei Kühlkreisläufe erforderlich

** Annahme auf Basis von Angaben in [47], 500 W unterhalb von 10 km h⁻¹, sonst 250 W

*** Wert für Navigation abweichend von [50] mit 100 W angenommen

Bezüglich des elektrischen Leistungsbedarfs des Bordnetzes sind in der Literatur häufig zeitunabhängige Werte als Mittelwerte im Fahrbetrieb oder für bestimmte Betriebszustände zu finden. So beträgt die Grundlast in heutigen Pkw nach Angaben in [46, S. 7] 300 bis 500 W_e . Laut Bitsche et al. (2004) [52] liegt der Bordnetzbedarf zwischen 800 und 1500 W_e während der Stopp-Phasen. Für Batterie-Pkw gibt [53] die mittlere Nebenverbraucherleistung mit 400 W_e an. Karden et al. (2007) [54] geben als Zielwert des FreedomCAR Programms für die Leistungsfähigkeit von 42 V Bordnetzen in unterschiedlich stark hybridisierten Pkw 3 kW_e

für die Dauer von 5 min während des Motorstillstands an. Dieser Wert bezieht sich auf Pkw mit reiner Stopp-Startfunktion (*Zero power assist*, ZPA) sowie auf Pkw mit partieller Antriebsunterstützung (*Partial power assist*, PPA) und voller Antriebsunterstützung (*Full power assist*, FPA). Der zugehörige elektrische Energiedurchsatz der Batterie beträgt 28 Wh km^{-1} (ZPA), 35 Wh km^{-1} (PPA) beziehungsweise 59 Wh km^{-1} (FPA), wobei nur die Batterieentladung betrachtet wird.

Gemäß der Aufgabenstellung soll in der vorliegenden Arbeit die elektrische Leistung des Bordnetzes zeitabhängig dargestellt werden. Dazu ist in **Tab. 3-6** eine Zusammenstellung von absoluten Leistungen und eine Charakterisierung der Einschalt Dauern von Bordnetzverbrauchern zu finden, aus denen der Bordnetzbedarf ermittelt wird. Kurzzeitige Stromspitzen, wie sie durch Einschaltströme verursacht werden, bleiben hier unberücksichtigt, da abgeschätzt wird, dass deren Einfluss auf die Energiebilanz vernachlässigbar ist. Für die Simulation werden die Verbraucher laut **Tab. 3-6** nach folgenden Kriterien ausgewählt:

- Antriebstopologie
- Pkw-Segment
- Umgebungsbedingungen

3.6 Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums

Einrichtungen zur Klimatisierung des Fahrzeuginnenraums stellen nach dem heutigen Stand die leistungsstärksten Nebenverbraucher in Pkw dar. Gemäß der Aufgabenstellung sollen Lastprofile, die sich aus deren Betrieb ergeben, in die Gesamtfahrzeugsimulation einbezogen werden. Dazu wird entsprechend den zuvor definierten Anforderungen an das Gesamtmodell ein vereinfachtes thermisches Innenraummodell erstellt. Nach kurzer Darstellung des Stands der Technik, wird das verwendete thermische Modell erläutert.

Zur Klimatisierung¹ des Fahrzeuginnenraums heutiger Pkw wird Frischluft oder rezirkulierte Kabinenluft durch einen Heizkörper beheizt beziehungsweise an der Oberfläche des Verdampfers eines Klimageräts gekühlt. Neben der Temperierung des Fahrzeuginnenraums werden auch sicherheitsrelevante Funktionen ausgeführt, wie zum Beispiel Front-, Heck- und Seitenscheiben beschlag- oder eisfrei zu halten. Jung et al. (2011) geben in [55] für das Konfidenzintervall von 99,5 % um den europäischen Temperaturmittelwert von etwa 15°C einen maximalen Leistungsbedarf zum Heizen im Winter von $4,5 \text{ kW}$ und zum Kühlen im Sommer von $2,3 \text{ kW}$ an. Diese Werte gelten zur Aufrechterhaltung einer Kabinentemperatur von 22°C für die mittlere Fahrgeschwindigkeit im Europäischen Stadtfahrzyklus (ECE) von 18 km h^{-1} und einen Luftmassenstrom von 5 kg min^{-1} . Die Außentemperaturen betragen -15°C beziehungsweise 36°C .

¹ Der Begriff der Klimatisierung beinhaltet auch die Regelung der Luftfeuchte; in dieser Arbeit wird die Luftfeuchte nur im Kühlbetrieb beim Unterschreiten des Taupunkts der zu kühlenden Luft beeinflusst.

Der Heizenergiebedarf des Innenraums wird bei ICV mit im Kühlwasser enthaltener Motorabwärme gedeckt und muss nicht eigens erzeugt werden. Ein Wasserheizkörper bildet den Wärmetauscher, der mit bis zu 100°C heißem Kühlwasser des Motors durchströmt wird. Die Wärme wird dabei dem in den Innenraum geleiteten Luftstrom zugeführt. Reicht die Wärmemenge nicht aus, kann die Temperatur der zugeführten Luft mithilfe eines Zuheizers weiter erhöht werden. Elektrisch betriebene PTC-Zuheizer¹ und kraftstoffbetriebene Zuheizer sind für Pkw verfügbar. Die zum Betrieb des Kühlkreislaufs eines Klimageräts benötigte mechanische Leistung wird als verbrauchserhöhendes Zusatzmoment am Motor abgegriffen. Der Energieaufwand zum Heizen oder Kühlen lässt sich durch rezirkulierte Kabinenluft verringern. Eine zu starke Sauerstoffabreicherung oder ein zu hoher Wasseranteil der Kabinenluft in Verbindung mit Scheibenbeschlag begrenzen den Anteil rezirkulierbarer Kabinenluft.

Bei Hybrid-Pkw mit Verbrennungsmotor und vollelektrischen Pkw ist eine verbrennungsmotorgekoppelte Wärme- und Kältebereitstellung nur noch teilweise beziehungsweise nicht mehr möglich. Ein Lösungsansatz ist bei *Micro*- oder *Mild*-Hybridkonzepten (siehe Bild 4-1, S. 56) der Einsatz von Wärme- oder Kältespeichern. Ziel ist es dabei, auch bei sinkenden Betriebszeitanteilen des Verbrennungsmotors eine möglichst große Menge motorgekoppelt erzeugter Wärme beziehungsweise Kälte nutzbar zu machen. Zur weiter verbesserten Nutzung der Motorabwärme können Abgaswärmetauscher eingesetzt werden [55, 56]. Beim Toyota Prius der dritten Generation dient ein solches System zur schnelleren Innenraumwärmerung nach dem Kaltstart [56, S. 261]. Prinzipiell können auch die Abwärmemengen von Wandlern und Übertragern des Elektroantriebs zur Kabinenbeheizung genutzt werden. Eine deutlich erhöhte Systemkomplexität sowie das veränderte Temperaturniveau der anfallenden Wärme müssen berücksichtigt werden. Zur Deckung des darüber hinaus gehenden Wärmebedarfs sind PTC-Zuheizer hoher Leistung verfügbar, die bei Spannungen bis zu 500 V Heizleistungen von bis zu 7 kW_{th} bereitstellen [57, 58]. Alternativ können auch flüssige Brennstoffe, wie zum Beispiel Ethanol mithilfe geeigneter Brenner Wärme bereitstellen. Hierzu werden in [58, 59] thermische Leistungen verfügbarer Geräte von $2,2$ bis $3,8\text{ kW}_{th}$ genannt. Schadstoffemissionen solcher Brenner müssen berücksichtigt werden. Die motorunabhängige Kälteerzeugung erfolgt mithilfe elektrisch betriebener Klimageräte.

In dieser Arbeit wird der Energieaufwand zum Beheizen beziehungsweise Kühlen des Innenraums für die in **Tab. 3-7** definierten Fälle ermittelt. Die Temperaturen für die Fälle „Sommerstag“ (SOT) und „Frosttag“ (FRT) werden als Grenztemperaturen der Definition klimatologischer Kenntage des Deutschen Wetterdienstes [60] übernommen. Ein Sommertag muss demnach ein Tagesmaximum von $\geq 25^{\circ}\text{C}$ aufweisen; ein Wintertag ein Tagesminimum von $\leq 0^{\circ}\text{C}$. Als Anfangstemperaturen werden die Sollwerte der Kabinentemperatur von 22°C angenommen.

¹ PTC-Zuheizer (*Positive temperature coefficient*, PTC) sind elektrische Zuheizer deren elektrischer Widerstand mit der Temperatur ansteigt. Im Pkw-Einsatz sind keramische PTC-Zuheizer mit nichtlinearem Widerstandsverlauf.

Tab. 3-7: Untersuchte Fälle der Fahrzeuginnenraumklimatisierung.

Die Umgebungstemperaturen der Fälle SOT und FRT orientieren sich an den klimatologischen Kenntagen laut dem Deutschen Wetterdienst [60]. Weitere Parameter sind:

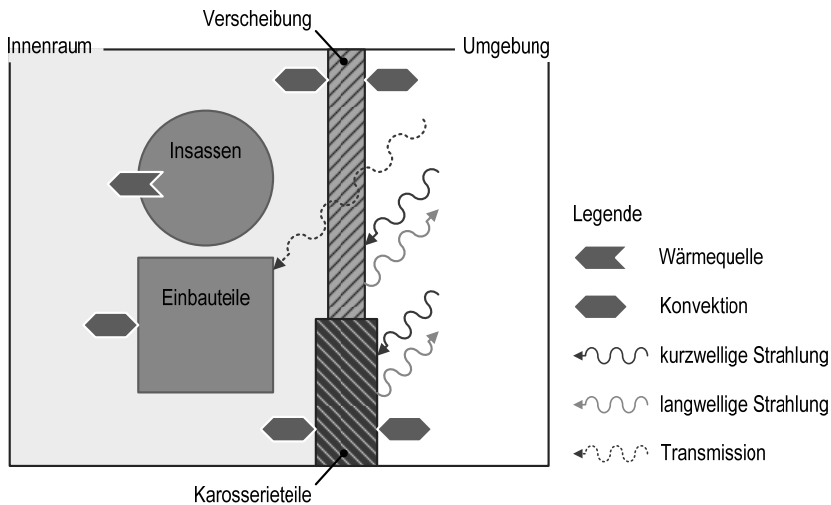
Umgebungsdruck: $p_{umg} = 1,013 \text{ bar}$,
 solarer Horizontalwinkel: $\psi_{sol} = 45^\circ$ (bezogen auf die Fahrtrichtung),
 solarer Höhenwinkel: $\varphi_{sol} = 60^\circ$.

Bezeichnung	Temperatur $\vartheta_{umg} / ^\circ\text{C}$	Luftfeuchte $f / \%$	Solare Einstrahlung $P_{sol} / \text{W m}^{-2}$	Anfangstemperatur im Innenraum $\vartheta_{0,Kab} / ^\circ\text{C}$
KKL: „Keine Klimatisierung“		Nicht erforderlich		
SOT: „Sommertag“	25	40 %	1000	22°C
FRT: „Frosttag“	0	80 %	0	22°C

Es wird ein vereinfachtes Modell eingesetzt, das abhängig von Außentemperatur, Sonnenstand und Fahrzeuggeschwindigkeit Wärmesenken und -quellen einer mit einer Person besetzten Kabine betrachtet (**Bild 3-7**).

Bild 3-7: Vereinfachtes Modell des Fahrzeuginnenraums.

Quelle: eigene Darstellung, angepasst nach [61, S. 18].



Das für den Einsatz in den hier entwickelten Gesamtfahrzeugmodellen erstellte Kabinenmodell stützt sich insbesondere bezüglich der Parametrierung und der geschwindigkeitsabhängigen Darstellung der Wärmeübergangskoeffizienten auf Großmann (2010) und Konz et al. (2012) [61, 62].

Es wird Wärmeübertragung durch Konvektion und Strahlung berücksichtigt. Konvektiver Wärmeübergang wird zwischen Einbauteilen und Kabinenluft, zwischen Pkw-Insassen und Kabinenluft sowie zwischen Kabinenaußenflächen und Umgebungsluft betrachtet. Strahlungswärmeaustausch wird zwischen den Einbauteilen und der Umgebung einbezogen. Demnach sind zu bestimmen:

- Umschließungsflächen des Innenraums unterschieden nach Karosserieteilen und Fensterscheiben,
- Wärmeübergangskoeffizienten zwischen den Oberflächen von Einbauten und Luft sowie zwischen Karosserieaußenflächen beziehungsweise Fensterscheiben und Luft,
- Wärmedurchgänge durch Karosserieteile und Fensterscheiben,
- Strahlungsaustauschkoeffizienten der Oberflächen,
- Transmissionskoeffizient der Fensterscheiben.

Die Innenraumtemperatur wird gemäß (Gleichung 3-16) als arithmetischer Mittelwert der Luftein- und -austrittstemperatur definiert und mithilfe von Temperatur und Massenstrom der zugeführten Luft geregelt.

$$T_{KB} = \frac{T_L^\alpha + T_L^\omega}{2} \quad (3-16)$$

T_{KB}	Innenraumtemperatur
T_L^α	Temperatur der Luft am Eintritt
T_L^ω	Temperatur der Luft am Austritt

T_L^α wird durch Einbringen von Heiz- oder Kühlleistung im Intervall $10^\circ\text{C} \leq T_L^\alpha \leq 50^\circ\text{C}$ erhöht oder abgesenkt. Der Massenstrom \dot{m}_L^α am Kabineneintritt kann im Intervall $4 \text{ kg min}^{-1} \leq \dot{m}_L^\alpha \leq 12 \text{ kg min}^{-1}$ [62, S. 29] variiert werden. Der Luftmassenstrom wird bedarfsgerecht geregelt.

Der auf die Fahrtrichtung bezogene Horizontalwinkel (Azimut)¹ der Sonne wird mit 45° angenommen. Die als Globalstrahlung bezeichnete solare Strahlungsleistung auf ebene, horizontale Flächen wird mit 1000 W m^{-2} festgelegt. Es werden folgende Vereinfachungen – teilweise in Übereinstimmung mit Konz et al. (2011) [61, S. 18-22] – getroffen:

- Fensterscheiben sind ebene Flächen, wobei die Anstellwinkel von Front- und Heckscheibe 30° beziehungsweise 40° betragen [62, S. 105];
- den Innenraum begrenzende Seitenscheiben und seitliche Karosserieteile werden als vertikale, ebene Flächen und das Dach als horizontale ebene Fläche angenommen;
- Einbauteile verfügen über eine einheitliche Wärmekapazität und einen einheitlichen Absorptionskoeffizienten;
- Oberflächentemperaturen von Einbau- und Karosserieteilen sind gleich der Bauteiltemperatur;
- durch Fensterscheiben transmittierte Strahlung wird vollständig von den Einbauten aufgenommen ($\alpha_{abs,ET} = 1$);

¹ Daraus resultiert bei hier angenommenem Sonnenhöchststand eine auf die Nordrichtung bezogene Fahrtrichtung von 135° (Richtung Südost).

- Lufteintrag durch die Karosse wird vernachlässigt.

Weitere Annahmen betreffen den Wärme- und Wassereintrag von Pkw-Insassen mit $120 W_{th}$ [62, S. 19] beziehungsweise $30 g h^{-1}$ [62, S. 17]. Bezüglich des Wassereintrags wird gasförmiges Wasser angenommen.

Die Temperatur der austretenden Luft wird ausgehend von der Enthalpiebilanz der Kabinenluft wie folgt bestimmt:

$$T_L^\omega = \frac{1}{m_{L,KB} \cdot c_{p,L,KB}} \int (\dot{H}_L^\alpha - \dot{H}_L^\omega + \dot{Q}_{Ins} - \dot{Q}_{knv,KTI} - \dot{Q}_{knv,SNI} - \dot{Q}_{knv,ET}) dt + T_L^\alpha \quad (3-17)$$

$m_{L,KB}$	Masse des Luftvolumens in der Kabine
$c_{p,L,KB}$	Spezifische Wärmekapazität der Luftmasse in der Kabine
$\dot{H}_L^\alpha \mid \dot{H}_L^\omega$	Enthalpiestrom der eintretenden austretenden Luft
\dot{Q}_{Ins}	Wärmeabgabe eines Pkw-Insassen
$\dot{Q}_{knv,KTI}$	konvektiver Wärmeübergang an den Innenflächen der Karosserieteile
$\dot{Q}_{knv,SNI}$	konvektiver Wärmeübergang an den Innenflächen der Verschiebung
$\dot{Q}_{knv,ET}$	konvektiver Wärmeübergang von Einbauteilen
T_L^ω	Temperatur der austretenden Luft
T_L^α	Temperatur der eintretenden Luft

Es wird davon ausgegangen, dass der eintretende Luftmassenstrom durch Frischluft gedeckt wird. Der Einsatz von Speichern wird nicht betrachtet. Als Quellen für Heizenergie werden die Abwärme der Antriebskomponenten Verbrennungsmotor, Elektromotor und Brennstoffzelle sowie elektrische Heizer berücksichtigt. Zur Kühlung kommen elektrisch betriebene Klimageräte zum Einsatz.

Aufgrund der bei den Umschließungsflächen berücksichtigten Strahlungswärme muss die Temperatur der Bauteiloberflächen bestimmt werden (Gleichung 3-18). Es wird dabei angenommen, dass die Oberflächentemperaturen von Fensterscheiben und Karosserieteilen gleich den Bauteiltemperaturen sind. Wärmeleitung wird nicht berücksichtigt.

$$T_i = \frac{1}{m_i \cdot c_i} \int (\dot{Q}_{sol,i} - \dot{Q}_{str,i} - \dot{Q}_{knv,i} + \dot{Q}_{KB,i}) dt + T_{i,0} \quad (3-18)$$

m_i	Masse des Bauteils
c_i	spezifische Wärmekapazität des Bauteils
$\dot{Q}_{KB,i}$	Wärmestrom zwischen Innenraum und Bauteil
$\dot{Q}_{knv,i}$	konvektiver Wärmeübergang an den Bauteiloberflächen
$\dot{Q}_{sol,i}$	solar eingestrahlte Wärme
$\dot{Q}_{str,i}$	an die Umgebung abgegebene Strahlungswärme
T_i	Temperatur des Bauteils
$T_{i,0}$	Anfangstemperatur des Bauteils

Die zur Berechnung von T_L^ω laut Gleichung 3-17 erforderlichen Temperaturen von Einbaubeziehungsweise Karosserieteilen sowie der Fensterscheiben können mithilfe der Wärmebilanz dieser Teile ermittelt werden (Gleichung 3-19). Die auf Einbauteile auftreffende Strahlung ist um die an den Fensterscheiben auftretenden Transmissionsverluste verringert. Reflexion solarer Strahlung an den Oberflächen wird vernachlässigt.

$$T_{ET} = \frac{1}{m \cdot c_{ET}} \int (\dot{Q}_{knv,ET} + \dot{Q}_{str,trans}) dt + T_{ET,0} \quad (3-19)$$

c_{ET}	Spezifische Wärmekapazität der Einbauteile
$\dot{Q}_{knv,ET}$	durch Konvektion übertragener Wärmestrom
$\dot{Q}_{str,trans}$	durch Strahlung übertragener Wärmestrom
T_{ET}	Temperatur der Einbauteile

Bei Karosserieteilen wird analog vorgegangen.

Für konvektive Wärmeübergänge werden vereinfacht nach [61, S. 20, 62, S. 70] geschwindigkeitsabhängige Wärmeübergangskoeffizienten an den Innen- beziehungsweise Außenflächen der Karosserieteile und Scheiben bestimmt:

$$\alpha_{i,I} = c_{i,I} \cdot \dot{m}_L^{\alpha_{0,5}} + \alpha_{i,I,0} \quad (3-20)$$

$$\alpha_{i,A} = c_{i,A} \cdot v^{0,8} + \alpha_{i,A,0} \quad (3-21)$$

$\alpha_{i,I A}$	Wärmeübergangskoeffizient an der Innenseite Außenseite des Bauteils i
$c_{i,I A}$	Konstante laut [61, S. 74] für Innenseite Außenseite des Bauteils i
\dot{m}_L^α	zugeführter Luftmassenstrom [$kg \ h^{-1}$]
v	Fahrzeuggeschwindigkeit [$m \ s^{-1}$]

Für die Wärmeübergangskoeffizienten werden Minimalwerte $\alpha_{i,I,0}$ beziehungsweise $\alpha_{i,A,0}$ definiert, da konvektive Wärmeübertragung auch bei Fahrzeugstillstand und bei ausgeschaltetem Innenraumgebläse stattfindet.

Solare Einstrahlung wirkt auf die Außenflächen der Karosserieteile und Scheiben sowie – nach Abzug der Transmissionsverluste – auf die Oberflächen der Einbauteile, jeweils unter Berücksichtigung der in Strahlungsrichtung projizierten Karosserie- beziehungsweise Scheibenflächen. Langwelliger Strahlungsaustausch mit der Umgebung wird unter Annahme grau strahlender Oberflächen berücksichtigt:

$$\dot{Q}_{str,i} = C_{12} \cdot A_i \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (3-22)$$

A_i	Oberfläche des Bauteils i
C_{12}	Strahlungsaustauschkoeffizient
T_1	Temperatur des Bauteils
T_2	Temperatur der Umgebung

Der Strahlungsaustauschkoeffizient C_{12} wird mit $A_i \ll A_{Umg}$ vereinfacht wie folgt bestimmt [63, S. Ka 6]:

$$C_{12} = \varepsilon \cdot \sigma \quad (3-23)$$

ε Emissionsgrad, $\varepsilon = 0,92$

σ Stefan-Boltzmann Konstante mit $\sigma = 5,67040 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-1}$

Die Stoffdaten von Luft werden abhängig von der Temperatur auf Basis eines empirischen Ansatzes laut NIST (2012) [39] dargestellt. Diese Funktion wird auch zur Energie- und Stoffbilanzierung im Modul des Brennstoffzellensystems verwendet. Die bauteilspezifischen Berechnungsparameter sind in **Tab. 3-8** zusammengefasst.

Tab. 3-8: Parameter zur Ermittlung des Wärme- oder Kältebedarfs.

Das Innenraumvolumen V_{KB} beträgt $2,5 \text{ m}^3$; Quellen: [61, S. 76, 62, S. 109, 63, S. Ka 5]; Werte für betrachtete Pkw des C-Segments; Klammerwerte für A-Segment; **N.A.**: nicht anwendbar.

Bezeichnung	Gesamtfläche	Masse	Wärmekapazität	Wärmeübergang	Transmissionskoeffizient
	A_i / m^2	m_i / kg	$c / \text{J kg}^{-1} \text{K}^{-1}$	$k \cdot A / \text{W K}^{-1}$	$\tau_i / -$
Spritzwand	1,1 (0,9)	6,9 (5,7)	480	7,70	N.A.
Karosserie Seitenteile, rechts	1,7 (1,3)	10,7 (7,9)	480	3,59	N.A.
Heck	1,1 (0,9)	6,9 (5,7)	480	2,33	N.A.
Karosserie Seitenteile, links	1,7 (1,3)	10,7 (7,9)	480	3,59	N.A.
Dach	1,7 (1,0)	10,7 (6,3)	480	3,58	N.A.
Unterboden	2,8 (2,1)	17,6 (13,2)	480	6,44	N.A.
Frontscheibe	1,1 (0,8)	13,6 (9,9)	804	4,23	0,60
Seitenscheiben, rechts	0,6 (0,4)	6,0 (4,0)	804	2,31	0,51
Heckscheibe	0,5 (0,4)	5,0 (4,0)	804	2,27	0,51
Seitenscheiben, links	0,6 (0,4)	6,0 (4,0)	804	2,31	0,51
Einbauten	9,0 (5,0)	300 (185)	1250	11,5	N.A.

Im hier entwickelten Modell betragen die Heizleistung $4,3 \text{ kW}$ unter den weiter oben definierten Bedingungen 18 km h^{-1} und -15°C [55] und die Kühlleistung $2,2 \text{ kW}$ bei 36°C und ebenfalls 18 km h^{-1} [55] für stationäre Betriebsbedingungen. Diese Ergebnisse liegen mit einer Abweichung von $-0,2 \text{ kW}$ im Heizfall und $-0,1 \text{ kW}$ im Kühlfall nur leicht unter den zuvor genannten Literaturwerten. Der kA -Wert der Umschließungsflächen beträgt 39 WK^{-1} .

3.7 Bereitstellung mechanischer Antriebsleistung

Entsprechend der Auswahl der Pkw-Konzepte (Tab. 1-1, S. 6) kommen zur Erzeugung mechanischer Antriebsleistung Verbrennungskraft- und Elektromaschinen zum Einsatz. Die Anpassung der Betriebsbereiche der Antriebsmaschinen an die Erfordernisse des Fahrbetriebs erfolgt über Getriebe und Achsantrieb. Kommen Kombinationen von Verbrennungsmotor und Elektromaschinen zum Einsatz, werden die Leistungsanteile der Maschinen zur Bereitstellung der insgesamt geforderten Antriebsleistung durch Gangstufenwahl und Steuerungsfunktionen des Leistungsmanagements bestimmt.

3.7.1 Verbrennungsmotoren

Als Verbrennungskraftmaschinen für ICV und HEV werden für die vorliegende Analyse ausschließlich Hubkolbenmotoren als Vierzylinderreihenmotoren betrachtet. Im Weiteren wird der Begriff Verbrennungsmotor (VM) verwendet. Die Einbeziehung anderer Bauarten oder anderer Maschinentypen ist im Simulationsmodell über den Austausch von Motorkennung und Betriebskennfeld grundsätzlich möglich. Dann sind unter Umständen andere Vorgehensweisen bei der Skalierung der Antriebskomponenten und der Wahl der Getriebeart sowie der Übersetzungsstufen anzuwenden. Gemäß den in Kapitel 2 benannten Anforderungen wird in dieser Arbeit ein vereinfachter Modellansatz gewählt, der die Abbildung des Betriebsverhaltens anhand von Motorkennung und Betriebskennfeld ermöglicht. Bezüglich des dynamischen Verhaltens wird das Trägheitsmoment J_{VM} des Motors entsprechend den Erläuterungen im Abschnitt 3.2 berücksichtigt.

Verbrennungsmotoren, die in heutigen Massenmarkt-Pkw eingesetzt werden, verfügen über einen sehr hohen Entwicklungsstand bezüglich Kosten, Zuverlässigkeit, Lebensdauer und Dynamik sowie spezifischer Leistung und Leistungsdichte. Es werden maximale Wirkungsgrade von mehr als 40 % bei Dieselmotoren und von mehr als 35 % bei Ottomotoren erreicht. Bezüglich der Leistungsdaten werden VM in Pkw typischerweise auf das Erreichen spezifischer Fahrleistungsanforderungen, wie zum Beispiel der Höchstgeschwindigkeit und der Beschleunigungsfähigkeit hin dimensioniert. Dies führt im realen Fahrbetrieb, besonders aber im Stadtverkehr, zu Betriebszuständen bei sehr geringer Teillast. Betriebsbereiche geringen spezifischen Kraftstoffverbrauchs können dann wegen fehlender Bedarfsleistung nicht erreicht werden [40, S. 113]. Technische Ansätze zur Optimierung des Betriebs von VM werden im Abschnitt 4.1 im Zusammenhang mit der Hybridisierung erläutert.

Zur Leistungsbilanzierung sind (i) der Kraftstoffverbrauch, (ii) die vom Motor über das Kühlwasser abgegebene Wärme sowie (iii) die Kühlmitteltemperatur zu ermitteln. Die Bestimmung des Kraftstoffverbrauchs \dot{V}_{KS} mit der Einheit $[l \cdot h^{-1}]$ erfolgt mithilfe eines 2-dimensionalen Betriebskennfelds:

$$\dot{V}_{KS} = f(M_{VM}, \omega_{VM}) \quad (3-24)$$

Drehgeschwindigkeit ω_{VM} und Drehmoment M_{VM} sind durch den momentanen Fahrzustand und die Gesamtübersetzung des Antriebs bestimmt. Der Wirkungsgrad lässt sich angeben mit:

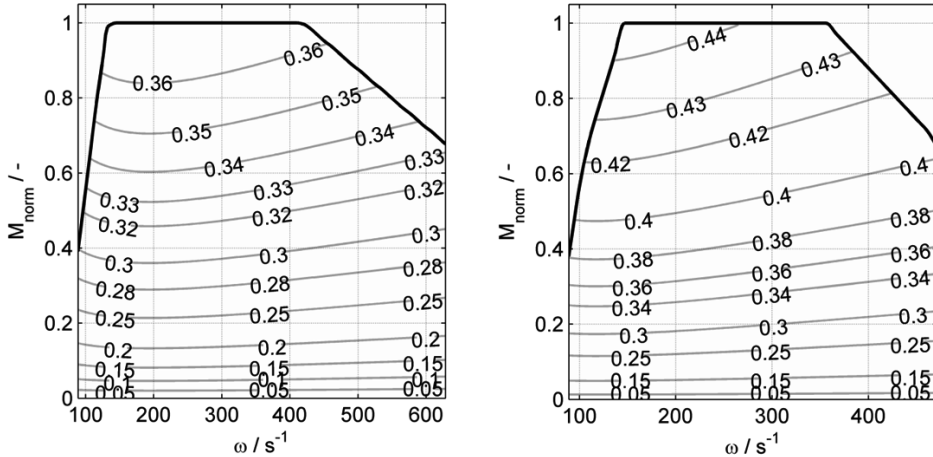
$$\eta_{VM} = \frac{P_{VM}^m \cdot 3,6}{\dot{V}_{KS} \cdot \varrho_{KS} \cdot H_{u,KS}} \quad (3-25)$$

ϱ_{KS}	Kraftstoffdichte
$H_{u,KS}$	massebezogener unterer Heizwert des Kraftstoffs
P_{VM}^m	mechanische Leistung des Motors.

Bild 3-8: Motorkennung und Betriebskennfeld von Verbrennungsmotoren im Szenario „Standard“.

Drehmomente normiert auf den Wert eins; Drehzahlen entsprechend den Drehzahlbereichen von Otto- und Dieselmotoren. Szenariendefinitionen siehe Abschnitt 6.1, S. 113ff. Quelle bezüglich Kennfeld: [64, 65]; Quelle bezüglich Motorkennung: [66, 67];

Links: Ottomotor; **Rechts:** Dieselmotor.

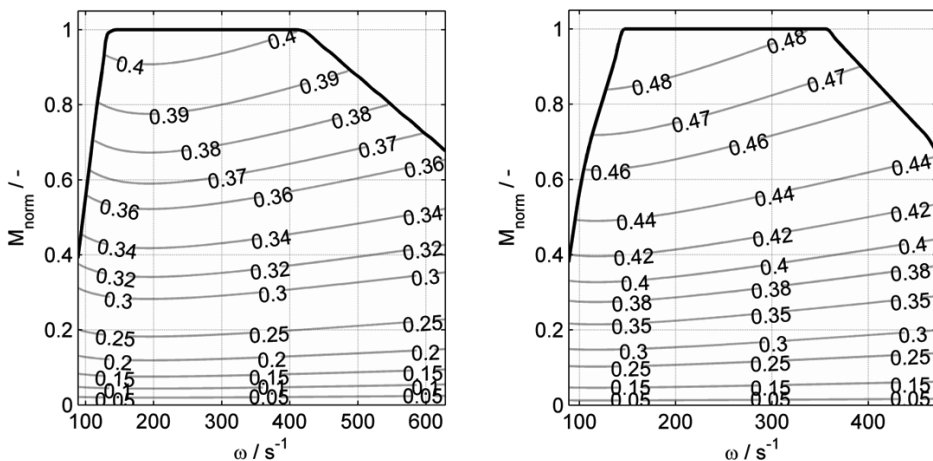


Zur Berücksichtigung der Betriebsgrenzen werden das maximale Drehmoment $M_{VM,max}(\omega_{VM})$ und das Schleppmoment $M_{VM,schlepp}(\omega_{VM})$ benötigt. Die Skalierung erfolgt ebenfalls unter Nutzung der Motorkennung nach dem im Abschnitt 5.4 erläuterten iterativen Verfahren. Die spezifische Leistung wird entsprechend Angaben in [11, S. 24] mit $0,58 \text{ kW kg}^{-1}$ für direkteinspritzende Ottomotoren und $0,51 \text{ kW kg}^{-1}$ für direkteinspritzende Dieselmotoren angesetzt.

Bild 3-9: Motorkennung und Betriebskennfeld von Verbrennungsmotoren im Szenario „Zukunft“.

Anmerkungen siehe Bild 3-8;

Links: Ottomotor; **Rechts:** Dieselmotor.



Das hier eingesetzte Betriebskennfeld wurde unter Nutzung von Angaben laut Rhode-Brandenburger (1996) [65] erstellt. Da diese Originalquelle nicht mehr zur Verfügung steht, wurden Angaben in [64] verwendet, in denen die Berechnungsgrundlagen dokumentiert sind. Das normalisierte VM-Betriebskennfeld für die in dieser Arbeit simulierten ICV des C-Segments im Szenario „Standard“ kann **Bild 3-8** entnommen werden. Kraftstoffverbräuche wurden zur Darstellung in der Abbildung gemäß Gleichung 3-25 in Wirkungsgrade umgerechnet.

Als Teil der Szenariendefinition laut Abschnitt 6.1 werden für Verbrennungsmotoren Kennfeldanpassungen zur Wirkungsgradverbesserung für das Szenario „Zukunft“ vorgenommen. Diese beziehen sich einerseits auf den Nulleistungsverbrauch laut [64, 65], sowie auf den leistungsspezifischen Verbrauch, die jeweils um 10 % reduziert werden. Die resultierenden Kennfelder zeigt **Bild 3-9**.

3.7.2 Elektrische Maschinen

Elektrische Maschinen (EM) verfügen gegenüber Verbrennungsmotoren über deutliche Vorteile im Fahrzeugeinsatz. Das Drehmomentverhalten ermöglicht eine hohe Beschleunigungsfähigkeit aus dem Fahrzeugstillstand heraus. Anfahrlemente werden nicht benötigt. Aufgrund des großen Drehzahlbereichs kann die Zahl der Gangstufen auf $z = 1$ bis $z = 2$ reduziert werden. Wirkungsgrade liegen deutlich oberhalb derer von Verbrennungsmotoren und erreichen Werte von mehr als 90 %. In HEV werden EM hauptsächlich zur Realisierung von *Boost*-Funktion, Lastpunktanhebung, Lastpunktreduktion, batterieelektrischem Fahren und rekuperativem Bremsen benötigt (siehe Unterabschnitt 4.1.1).

Aufgrund vielfältiger Einsatzmöglichkeiten als direkter Radantrieb und als Antriebskomponente in Hybridantrieben mit VM wurden unterschiedliche Bauformen entwickelt ([68, S. 57]):

- scheibenförmige Maschinen für den Einsatz an der Kurbelwelle oder als Radnabenmotoren,
- zylinderförmige Maschinen als radnahe oder Zentralmotoren für Front- oder Heckantrieb.

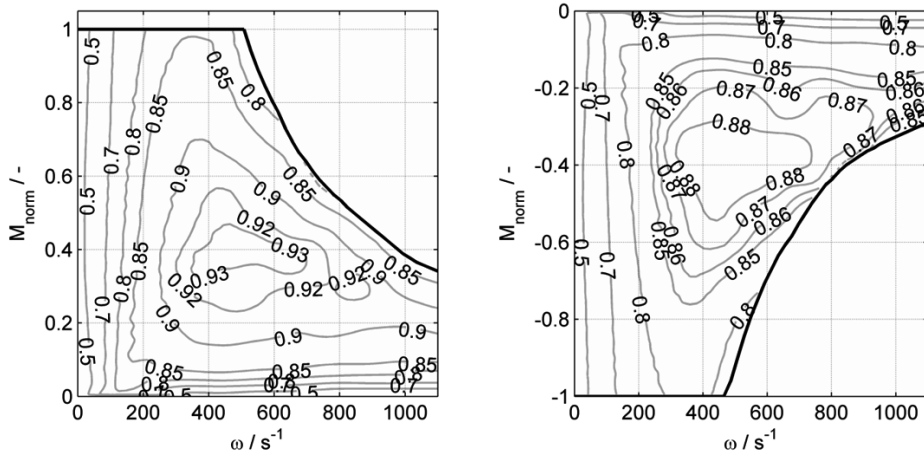
Bei HEV werden Elektromaschinen an der Kurbelwelle, integriert in Automatik- oder Planetengetriebe oder – bei Konzepten mit Zugkraftaddition (siehe Bild 4-1, S. 56) – als auf die jeweils andere Achse wirkende Zentral- oder Radnabenmotoren ausgeführt.

Analog zur Vorgehensweise bei Verbrennungsmotoren werden Motorkennung und Betriebskennfeld zur Beschreibung elektrischer Maschinen verwendet. Die Motorkennung umfasst die Betriebsbereiche von Motor und Generator. Das 2-dimensionale Betriebskennfeld enthält Wirkungsgradangaben in Abhängigkeit von Drehmoment und Drehzahl, siehe **Bild 3-10**. Das Wirkungsgradverhalten des Inverters ist im Betriebskennfeld bereits enthalten. Es wird angenommen, dass das Hochspannungsbordnetz bei konstanter Spannung betrieben wird und eine Spannungsabhängigkeit des Wirkungsgrads daher nicht berücksichtigt werden muss. Die Skalierung erfolgt ebenfalls unter Nutzung der Motorkennung (siehe Abschnitt 5.4). Die

spezifische Leistung der Elektromaschine einschließlich des Stromrichters wird auf Basis von Angaben in JEC (2008) [11] und Li et al. (2008) [69] mit $1,0 \text{ kW kg}^{-1}$ festgelegt.

Bild 3-10: Motorkennung und Betriebskennfeld der im Modell verwendeten Elektromaschinen [70] im Szenario „Standard“.

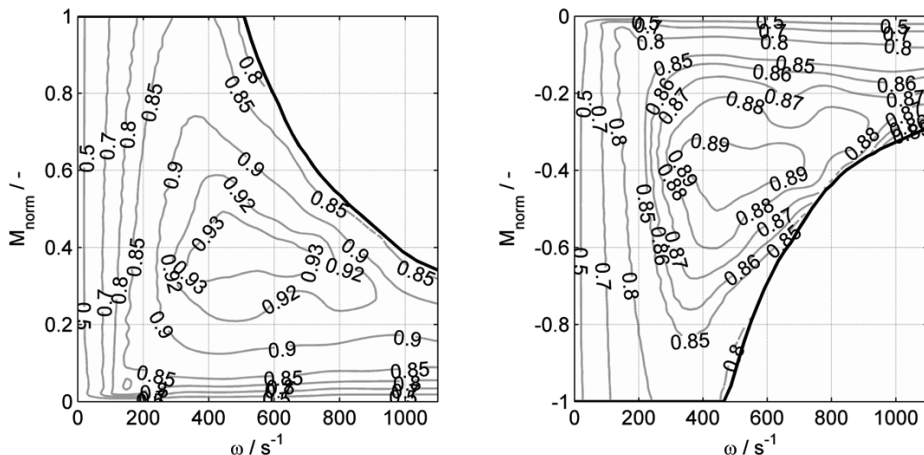
Links: Motorbetrieb; **Rechts:** Generatorbetrieb. Szenariendefinitionen siehe Abschnitt 6.1, S. 113ff.



Auch für die Elektromaschinen werden Kennfeldverbesserungen für das Szenario „Zukunft“ gegenüber dem Szenario „Standard“ angenommen. Diese beziehen sich auf die Reduktion der Verlustleistungen um jeweils 10 % für jeden Punkt des Kennfelds. Das auf diese Weise verbesserte Kennfeld kann **Bild 3-11** entnommen werden.

Bild 3-11: Motorkennung und Betriebskennfeld der im Modell verwendeten Elektromaschinen [70] im Szenario „Zukunft“.

Links: Motorbetrieb; **Rechts:** Generatorbetrieb. Szenariendefinitionen siehe Abschnitt 6.1, S. 113ff.



3.7.3 Kraftübertragung

Die Funktion von Getrieben und Achsantrieben besteht darin, das von Antriebsmaschinen bereitgestellte Drehmoment dem momentanen Fahrzustand anzupassen. Aufgrund der Vielzahl möglicher Fahrzustände, zum Beispiel Fahren auf ebener Fahrbahn, bei Steigung oder Gefälle sowie beschleunigtes oder verzögertes Fahren, werden schaltbare Getriebe in Kombination mit festen Übersetzungen am Achsantrieb eingesetzt. Verbrennungsmotorantriebe erfordern aufgrund ihrer Drehzahlcharakteristik Anfahrerelemente in Form von Reibkupplungen oder hydrodynamischen Getrieben. Elektromotorische Antriebe benötigen keine Anfahrerelemente.

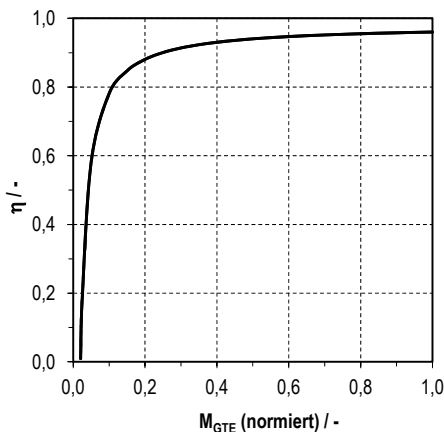
In dieser Arbeit werden automatische Stirnradschaltgetriebe betrachtet. Als Anfahrerelement für ICV und PAH werden dementsprechend Reibkupplungen angenommen. Die Zahl der Gangstufen wird mit $z = 6$ für ICV und PAH sowie mit $z = 2$ für BEV und FCV festgelegt.

Zur Ermittlung des Wirkungsgrads wird hier unter Nutzung von Angaben in Naunheimer et al. (2007) [40, S. 84] und Rodatz (2003) [44] ein auf Verzahnungsverlusten aufbauender linearer Ansatz verwendet. Das dazu definierte lastunabhängige Schleppmoment beträgt 1 % und das lastabhängige Verlustmoment ebenfalls 1 % des maximalen Eingangsdrehmoments. Je nach Anzahl der sich im Eingriff befindlichen Stirnradpaare kann so das Gesamtverlustmoment des Getriebes bestimmt werden. **Bild 3-10** zeigt das als Wirkungsgrad ausgedrückte Gesamtverlustmoment für den Fall, dass zwei Stirnradpaare im Eingriff sind. Bei der Berechnung des Verlustmoments am Achsantrieb wird in analoger Weise vorgegangen. Eine Drehzahlabhängigkeit des Getriebewirkungsgrads wird als vernachlässigbar angesehen und daher hier nicht betrachtet.

Bild 3-12: Getriebewirkungsgrad in Abhängigkeit des normierten Eingangsdrehmoments.

Es wird angenommen, dass zwei Stirnradpaare im Eingriff sind.

Quelle: Eigene Rechnung nach [40, 44].



Die Masse von Pkw-Getrieben kann laut [40, S. 63] mit folgender Gleichung abgeschätzt werden:

$$m_{GT} = 0,199 \cdot \left((i_{GT,max} \cdot M_{GTE,max})^{0,669} \cdot z^{0,334} \right) \quad (3-26)$$

m_{GT}	Getriebemasse
$i_{GT,max}$	maximale Getriebeübersetzung
$M_{GTE,max}$	maximales Getriebeeingangsmoment
z	Zahl der Gangstufen

Diese Gleichung bezieht sich auf koaxiale zweistufige Pkw-Vorgelegegetriebe. Angewandt auf drei Doppelkupplungsgetriebe mit 350 Nm (6-Gang), 320 Nm (6-Gang) und 250 Nm (7-Gang) entsprechend [71] zeigt sich, dass die mithilfe von Gleichung 3-26 ermittelten Werte um Faktoren zwischen 2,1 und 2,2 kleiner sind als die dort angegebenen Werte von 93 kg, 85 kg beziehungsweise 77 kg. Weitere Angaben für 6- und 7-Ganggetriebe mit Eingangsdrehmomenten zwischen 150 und 300 Nm liegen bei 57 kg (6DCT150 [72]), 68 kg (7DCT300 [73]) und 75 kg (6DCT250 [74]). Um eine bessere Übereinstimmung der in dieser Arbeit verwendeten Getriebemassen mit realen Werten laut [71, 72, 73, 74] zu erzielen, werden die mithilfe von Gleichung 3-26 ermittelten Werte verdoppelt.

3.8 Bereitstellung elektrischer Leistung für Antrieb und Bordnetz

Als Quellen elektrischer Leistung sind zuvor bereits *SLI*-Batterien und Lichtmaschinen (Abschnitt 3.5) sowie elektrische Antriebsmaschinen im Generatorbetrieb (Unterabschnitt 3.7.2) genannt worden. Darüber hinaus werden Brennstoffzellensysteme und Hochenergie- oder Hochleistungsbatterien zur Stromversorgung in Pkw genutzt. In den folgenden Unterabschnitten werden solche Systeme kurz beschrieben und die zur Erstellung und Parametrierung der Simulationsmodelle benötigten technischen Grundlagen und Parameter erläutert.

Als antriebsunabhängige Optionen der Bereitstellung elektrischer Leistung werden thermoelektrische Generatoren (TEG) und Photovoltaik- (PV-) Module berücksichtigt. Bezüglich der Bewertung des Einsatzes von *Auxiliary Power Units* (APUs) wird auf die Arbeiten von Diegelmann (2008) [75] und Grube et al. (2007) [27] verwiesen.

3.8.1 Batterien

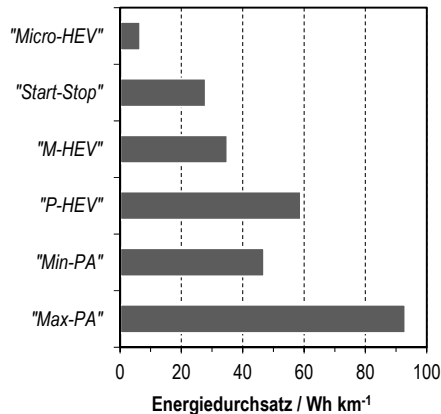
In nahezu allen Fahrzeugkonzepten sind Speicher elektrischer Energie erforderlich. Bei heutigen, rein verbrennungsmotorisch angetriebenen Pkw werden für den Motorstart kurzzeitig hohe Ströme bei einer relativ geringen Bordnetzspannung von 14 V benötigt. In HEV spielt die kurzzeitige Zwischenspeicherung antriebsrelevanter elektrischer Leistung bei möglichst hohem Wirkungsgrad eine zentrale Rolle, wobei unterschiedliche Ausprägungen von HEV auch zu unterschiedlichen Energiedurchsätzen führen (**Bild 3-13**)¹. BEV erfordern

¹ Im Gegensatz zu der in **Bild 3-13** auf Basis von Angaben in [54] angegebenen Bordnetzspannung von 42 V, sind heute Zwei-Spannungsbordnetze mit 48 V und 12 V in der Entwicklung.

Batterien mit hoher spezifischer Energie und Energiedichte zur Erzielung möglichst großer Reichweiten.

Bild 3-13: Energiedurchsatz in unterschiedlichen Ausprägungen von HEV.

Funktionalität der Konzepte: **Micro-HEV**: 12 V, SSA und BER; **Start-Stop**: 42 V, SSA höhere Bordnetzleistung als bei *Micro-HEV*; **M-HEV**: 42 V, LA mit 13 kW_e für 2 s; **P-HEV**: 42 V, LA mit 14,4 kW_e für 5 s; **Min-PA**: HS, 25 kW_e; **Max-PA**: HS, 40 kW_e. Abkürzungen: **BER**: Bremsenergie rückgewinnung; **HS**: Hochspannungsbatterie (nicht näher spezifiziert); **LA**: *Launch assist* zur Unterstützung der Beschleunigung; **PA**: Power Assist; **SSA**: Stopp-Startfunktion; Darstellung unter Nutzung von Angaben in [54].



Bereits diese Auswahl an Anforderungen an die Speicherung elektrischer Energie macht deutlich, dass der Technologieauswahl, der konstruktiven Gestaltung und der Skalierung elektrischer Speicher eine besondere Rolle zukommt. Im Zusammenhang mit der Aufgabenstellung dieser Arbeit sollen im Folgenden die hierfür relevanten Eigenschaften solcher Speicher zusammengefasst werden.

Bei elektrochemischen Sekundärbatterien, die im Weiteren, dem allgemeinen Sprachgebrauch angepasst, mit Batterien bezeichnet werden, ist der Energievorrat durch die Menge der im System vorhandenen aktiven Materialien festgelegt. Folgende Kriterien sind für den Fahrzeugeinsatz relevant:

- Spannungsniveau der Materialpaarungen [V]: bestimmt die Anzahl der bei gegebener Nennspannung zu verschaltenden Zellen,
- Spezifische Energie [$Wh\ kg^{-1}$]: bestimmt bei gegebener zu speichernder Energie die Masse der Batterie,
- Energiedichte [$Wh\ l^{-1}$]: bestimmt bei gegebener zu speichernder Energie das Volumen der Batterie,
- Spezifische Leistung [$W\ kg^{-1}$]: bestimmt bei gegebener Nennleistung die Masse der Batterie,
- Kalendarische Lebensdauer [a]: gegebenenfalls ist ein Austausch der Batterie während der Fahrzeuglebensdauer notwendig,

- Zyklenlebensdauer [–]: Maß für die Lebensdauer nach Lade-/ Entladezyklen,
- Selbstentladeraten.

Ein guter Überblick über Grundlagen und verfügbare Technologien ist unter anderem in Jossen (2006) [76], Macdonald (2007), [77, S. 377–423] und Wallentowitz (2006), [78, S. 249–280] zu finden.

Bei der Auswahl und Skalierung von Batterien für Pkw bestehen Freiheitsgrade in der Wahl von Leistung und Energievorrat. Bei der Skalierung von Speicherbatterien für BEV ist die Reichweite maßgeblich. Aufgrund der für Reichweiten von 100 bis 150 km notwendigen Batteriekapazität ergeben sich Lade- und Entladeleistungen, die für Fahrzeugantriebe ausreichend sind.

Hybridantriebe verfügen über Batterien mit geringeren Kapazitäten. Bei Vollhybriden liegt die Leistungsanforderung im Bereich mehrerer 10 kW_e, sodass hier spezielle Hochleistungsbatterien eingesetzt werden müssen. Bitsche et al. (2004) geben beispielsweise eine Batteriespannung von 300 V, eine Maximalleistung von 40 kW_e und einen Energieinhalt von 1,5 kWh_e an. Üblicherweise werden diese Batterien für hohe Lade- und Entladeströme optimiert. Die Kapazität der Batterie wird dadurch jedoch nur zum Teil genutzt. Betriebsbereiche des Ladezustands lassen sich für HEV ohne Plug-in Funktion mit Werten zwischen 50 % und 70 % angeben. Solche Batterien werden in der Regel nicht vollgeladen, da sich bei Ladezuständen oberhalb von etwa 80 % keine ausreichenden Ladeströme für die Bremsenergieerückgewinnung realisieren lassen.

Der Einsatzfall der Batterie entscheidet auch über die im Betrieb auftretenden, auf die Kapazität bezogenen Ströme (C-Rate¹). Für HEV typische Batterien mit ein bis zwei Kilowattstunden weisen C-Raten auf, die deutlich höher als 10 C sein können.

Tab. 3-9 fasst typische Batterieparameter für Blei-, Ni-MH- und Li-Ionen-Batterien zusammen. Es ist ersichtlich, dass Li-Ionen-Batterien bei den meisten Parametern Vorteile aufweisen. Bei der Zyklenlebensdauer sind sie in etwa gleichauf mit der Ni-MH-Technologie, die kalendarische Lebensdauer ist etwas geringer.

Bezüglich der Energiedichte liegen aktuellere Werte laut [79] für Konzept-Pkw mit Batterie, bei 71 Wh kg⁻¹ im Falle des BMW ActiveE und 135 Wh kg⁻¹ im Falle des BMW MiniE. Diese Fahrzeuge wurden 2010 beziehungsweise 2008 der Öffentlichkeit vorgestellt, sodass die niedrigere Energiedichte für das aktuellere Fahrzeug gilt. Es wird in dieser Arbeit davon ausgegangen, dass Li-Ionenbatteriemodule für den Pkw Einsatz eine spezifische Energie von 100 Wh kg⁻¹ aufweisen. Für das Szenario „Zukunft“ (siehe Abschnitt 6.1) werden als absehbaren Entwicklungsfortschritt 150 Wh kg⁻¹ angesetzt.

¹ Die C-Rate wird zum Vergleich von Batterien unterschiedlicher Kapazität verwendet. Mit 1C ist die Stromstärke definiert, die zur vollständigen Entladung der Batterie innerhalb von einer Stunde notwendig ist [76].

Tab. 3-9: Leistungsdaten von Batterien.

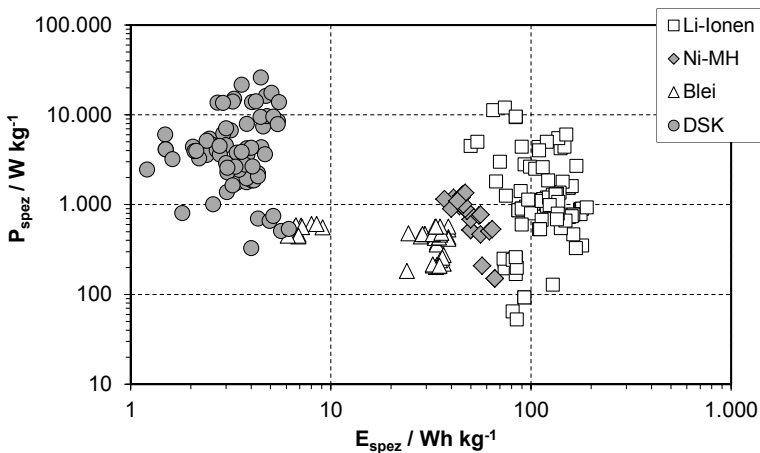
Daten nach [78, S. 249-280], ergänzt mit [76, S. 129]; Energiedichte bei 25°C; Spezifische Leistung: Blei- und Li-Ionen-Batterien bei 10 s, Ni-MH bei 18 s Pulslast (Laden und Entladen); Zyklenlebensdauer: Ni-MH und Li-Ionen: unterer (oberer) Wert für 100 % (± 3 %) Entladetiefe; Temperaturbereich: für in-Betrieb befindliche Zellen.

Parameter	[Einheit]	Blei	Ni-MH	Li-Ionen
Theoretische spezifische Energie	[Wh kg ⁻¹]	167	214	420
Spezifische Energie	[Wh kg ⁻¹]	35 ... 49	45 ... 75	65 ... 150
Spezifische Leistung	[W kg ⁻¹]	227 ... 310	250 ... 1000	600 ... 1500
Energiedichte	[Wh L ⁻¹]	70 ... 96	125 ... 182	130 ... 300
Leistungsdichte	[W L ⁻¹]	445 ... 620	600 ... 2800	1200 ... 3000
Kalendarische Lebensdauer	[a]	2 ... 6	12	7 ... 10
Zyklenlebensdauer	[1000]	0,1 ... 0,3	2,5 ... 300	2 ... 300
Selbstentladung	[Monat ⁻¹]	2 %...3 %	20 %...30 %	2 %...10 %
Temperaturbereich	[°C]	-30 ... 70	-10 ... 60	-25 ... 50

Darüber hinaus erlaubt das Ragone-Diagramm in **Bild 3-14** einen Vergleich von spezifischer Leistung- und Energie verschiedener Batterietypen. Es wird deutlich, dass mit Li-Ionen-Batterien die höchsten Werte für spezifische Leistung und Energie erzielt werden.

Bild 3-14: Ragone-Diagramm von Batterien und Doppelschichtkondensatoren.

Werte in der Darstellung repräsentieren die Umrechnung von gespeicherter Energie, Masse und Volumen realer Batterien und Doppelschichtkondensatoren in spezifische Werte. Gespeicherte Energie [Wh] als Produkt aus mittlerer Spannung und Kapazität; Li-Ionen: 5 bis 32 400, Ni-MH: 105 bis 6000, Blei: 7 bis 1300; DSK...Doppelschichtkondensator; Quelle: IEK-3 Recherche im Rahmen der Arbeit von Wilhelm (2010) [80].



Interessant ist hier noch der Vergleich zu Doppelschichtkondensatoren, die zwar eine deutlich geringere spezifische Energie, dafür aber eine um mehr als eine Größenordnung höhere spezifische Leistung gegenüber Blei- und Ni-MH Batterien aufweisen. Diesbezüglich optimierte Li-Ionenbatterien erreichen bereits Werte oberhalb von 10 kW kg^{-1} , liegen damit aber immer noch einen Faktor 2 bis 3 unter den besten Werten von Doppelschichtkondensatoren. Bezüglich der spezifischen Energie von Li-Ionenbatterien geht [76, S. 129]

langfristig davon aus, dass sich heute für Einzelzellen maximal verfügbare 200 Wh kg^{-1} um 50 % auf etwa 300 Wh kg^{-1} steigern lassen.

In elektrischen Stromkreisen stellen Batterien stromgesteuerte Spannungsquellen dar, wobei Innenwiderstand und Spannung von mehreren Parametern beeinflusst werden. Diesbezügliche Einflussfaktoren sind neben dem Strom der Lade- und Alterungszustand sowie die Temperatur. Das zu erstellende Modell einer Batterie soll den folgenden Anforderungen genügen:

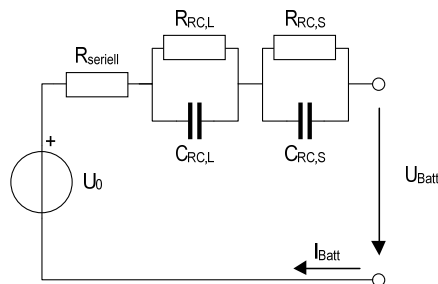
- Berücksichtigung der Abhängigkeit der Kapazität vom Entladestrom,
- Abbildung des dynamischen Lade- und Entladeverhaltens,
- Ermittlung der Batterieverluste zur Bestimmung von Wirkungsgrad und Wärmebilanz.

Selbstentladung und Degradation werden in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Auch komplexe Funktionen des Batteriemanagements können hier nicht betrachtet werden.

Das statische und dynamische Verhalten von Li-Ionenbatterien wird in dieser Arbeit mithilfe eines Ersatzschaltbilds idealer elektrischer Bauelemente abgebildet. In der Literatur ist dazu eine Vielzahl von Ansätzen für unterschiedliche Einsatzzwecke zu finden. Für dynamische Systemsimulationen werden häufig ideale Spannungsquellen in Verbindung mit Reihenschaltungen aus Widerständen und einem oder mehreren RC-Gliedern eingesetzt [81, 82, 83, 84, 85]. Das aufbauend auf einer Diskussion in [83] abgeleitete Ersatzschaltbild mit zwei RC-Gliedern wird auch in dieser Arbeit verwendet, siehe **Bild 3-15**. Die Parametrierung der ladezustandsabhängigen Widerstände und Kapazitäten erfolgte in [83] auf Basis von Messwerten. Die Skalierung von Kapazität und Spannung wird in dieser Arbeit durch Reihen- und Parallelschaltungen von Batteriezellen zu einem Modul so vorgenommen, dass die Nennleistung der Batterie bei Nennspannung und bei einem Entladestrom von 1 C erreicht wird. Die maximalen Lade- und Entladeströme werden mit 5 C festgelegt.

Bild 3-15: Batteriemodell für die Simulation.

Ersatzschaltbild zur Abbildung des dynamischen Betriebsverhaltens einer Li-Ionenbatterie (nach [83]).



Für die nachfolgend erläuterten Berechnungen ist die Definition des Ladezustands als Verhältnis der momentanen zur nominalen Batteriekapazität von Bedeutung:

$$SOC = \frac{C_{nom} - Q}{C_{nom}} \quad \text{mit } Q = \int I_{Batt} dt \quad (3-27)$$

SOC Batterieladezustand (*State of charge*)
 C_{nom} nominale Kapazität der Batterie [As]
 Q Ladung, hier Zeitintegral des Batteriestroms [As]

Die Batteriespannung wird nach der 2. Kirchhoff'schen Regel, ausgehend von der Leerlaufspannung unter Abzug der Summe der Spannungsabfälle über dem seriellen Widerstand und über den RC-Gliedern ermittelt:

$$U_{Batt} = U_0 - U_{R,seriell} - U_{RC,L} - U_{RC,S} \quad (3-28)$$

U_{Batt} Batteriespannung
 U_0 Leerlaufspannung
 $U_{R,seriell}$ Spannungsabfall über seriellen Widerstand
 $U_{RC,L}$ Spannungsabfall über RC-Glied „L“ (Zeitkonstante im Minutenbereich)
 $U_{RC,S}$ Spannungsabfall über RC-Glied „S“ (Zeitkonstante im Sekundenbereich)

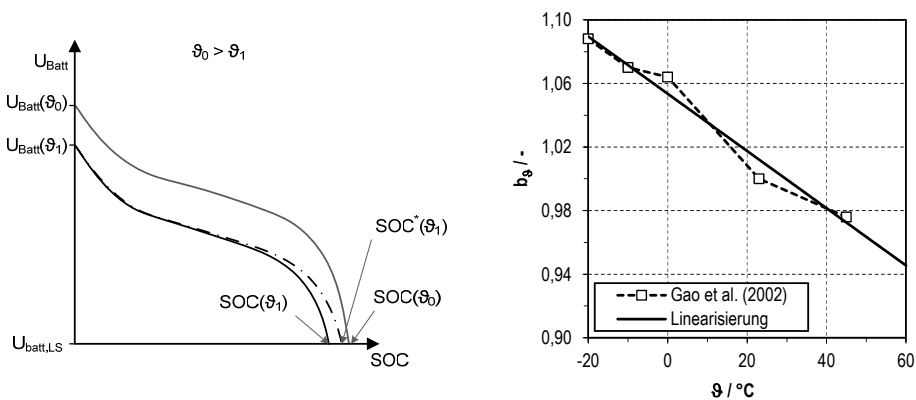
Im Modell wird U_0 zunächst abhängig vom Ladezustand dargestellt. Der Temperatureinfluss auf das Betriebsverhalten der Batterie wird in zweifacher Hinsicht berücksichtigt: Klemmenspannung und Batteriekapazität sinken mit der Temperatur. Beide Effekte sind qualitativ in **Bild 3-16** (links) in Anlehnung an [85] dargestellt.

Bild 3-16: Korrektur von Klemmenspannung und Batteriekapazität aufgrund des Temperatureinflusses.

Links: qualitative Darstellung.

Rechts: Faktor zur Korrektur der Batteriekapazität in Abhängigkeit von der Betriebstemperatur, siehe Gleichung 3-29.

Quelle: eigene Darstellung nach Gao et al. (2002), [85]), Erläuterungen siehe Text.



Die mit der Temperatur sinkende Klemmenspannung wird durch Verschiebung der u -SOC Kurve in negativer Spannungsrichtung berücksichtigt. Vereinfachend im Vergleich zu Angaben in [85] wird der Betrag der Verschiebung proportional zur Differenz zwischen Betriebstemperatur und Referenztemperatur von $23^\circ C$ mit $10 \text{ mV } K^{-1}$ angenommen. Dies

stellt den mittleren Anstieg der Klemmenspannung im dort angegebenen Temperaturbereich $-20^{\circ}\text{C} \leq \vartheta \leq 45^{\circ}\text{C}$ dar. Die Verschiebung der Kurve führt weiterhin zu einer Reduktion des SOC – in **Bild 3-16** (links) dargestellt als $SOC^*(\vartheta_1)$. Da dieser aus der Verschiebung resultierende SOC^* von tatsächlichen Messwerten des SOC abweicht, wird der Korrekturfaktor b_{ϑ} mit

$$b_{\vartheta} = \frac{SOC^*(\vartheta_1)}{SOC(\vartheta_1)} \quad (3-29)$$

eingeführt. Für die anhand von Messwerten ermittelte Kurve für b_{ϑ} entsprechend **Bild 3-16** (rechts) wird für die Modellierung des Betriebsverhaltens von Li-Ionenbatterien ein linearer Zusammenhang mit der aus der Abbildung ermittelten Geradengleichung angenommen und über den Wertebereich der Messung hinaus bis 60°C extrapoliert:

$$b_{\vartheta} = -0,0018 \cdot \vartheta + 1,0535 \quad \text{mit } -20^{\circ}\text{C} \leq \vartheta \leq 60^{\circ}\text{C} \quad (3-30)$$

Die Spannungsabfälle über den RC-Gliedern werden mit folgender Gleichung berechnet:

$$U_{RC,i} = \frac{1}{C_{RC,i}} \int I_{cell} - \frac{U_{RC,i}}{R_{RC,i}} dt \quad (3-31)$$

$U_{RC,i}$	Spannungsabfall [V] über RC-Glied i
$C_{RC,i}$	Kapazität [As V^{-1}] des Kondensators i laut Ersatzschaltbild (Bild 3-15)
I_{Batt}	Batteriestrom [A]
$R_{RC,i}$	Ohm'scher Widerstand [Ω] des RC-Glieds i

Zur Aufstellung der Wärmebilanz der Batterie wird folgender vereinfachter Ansatz gewählt:

$$m_{Batt} \cdot c_{Batt} \cdot \frac{dT_{Batt}}{dt} = \dot{Q}_{zu} + \dot{Q}_{knv} + \dot{Q}_{str} \quad (3-32)$$

m_{Batt}	Batteriemasse
c_{Batt}	Spezifische Wärmekapazität der Batterie
\dot{Q}_{zu}	zugeführte Wärme
\dot{Q}_{knv}	konvektiv übertragene Wärme
\dot{Q}_{str}	per Strahlungsaustausch übertragene Wärme

\dot{Q}_{zu} entspricht der Verlustleistung $P_{Batt,V}$ als Wärme an den Ohm'schen Widerständen $R_{seriell}$, $R_{RC,S}$ und $R_{RC,L}$ laut dem Ersatzschaltbild (**Bild 3-15**):

$$\dot{q}_{zu} = P_{Batt,V}^e = \sum R_i \cdot I_i^2 = R_{seriell} \cdot I_{Batt}^2 + R_{RC,S} \cdot I_{RC,S}^2 + R_{RC,L} \cdot I_{RC,L}^2 \quad (3-33)$$

\dot{Q}_{str} ist die Wärmeabfuhr durch Strahlung gemäß [86, S. D 35]:

$$\dot{Q}_{str} = \dot{Q}_{12} = C_{12} \cdot A_{Batt} \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (3-34)$$

C_{12}	Strahlungsaustauschkoefizient
A_{Batt}	Batterieoberfläche
T_1	Oberflächentemperatur
T_2	Umgebungstemperatur

Es wird angenommen, dass die Oberflächentemperatur T_1 des Moduls gleich der Temperatur der Kühlluft T_{KLL} ist. Die Strahlungsaustauschzahl C_{12} wird auf Basis von Angaben in [76, S. 23] für nichtmetallische Gehäuse mit $5,25 \cdot 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$ abgeschätzt.

Für die Berücksichtigung der Wärmeabfuhr durch Konvektion \dot{Q}_{knv} wird vereinfachend von folgender Gleichung ausgegangen:

$$\dot{Q}_{knv} = \dot{m}_{KLL} \cdot c_{p,KLL} \cdot (T_{KLL}^{\omega} - T_{KLL}^{\alpha}) \quad (3-35)$$

Für Eintritts- und Austrittstemperatur der Kühlluft T_{KLL}^{α} und T_{KLL}^{ω} werden die Umgebungsbeziehungsweise Batteriemodultemperatur angenommen. Der Massenstrom der Kühlluft wird so geregelt, dass die Betriebstemperatur nach Erreichen von maximal 40°C nicht weiter steigt.

Im Modell lässt sich nach Umstellen von Gleichung 3-32 die Temperatur der Batterie ermitteln mit:

$$T_{batt} = \frac{1}{\dot{m}_{Batt} \cdot c_{Batt}} \cdot \int \sum \dot{Q}_i dt + T_{Batt,0} \quad \text{mit } \sum \dot{Q}_i = \dot{Q}_{zu} + \dot{Q}_{knv} + \dot{Q}_{str} \quad (3-36)$$

Die Batteriemasse m_{Batt} wird mithilfe der Skalierungsroutine entsprechend den Erfordernissen der jeweiligen Antriebskonfiguration errechnet. Die angenommene spezifische Wärmekapazität beträgt $0,7 \text{ Wh kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$ [76, S. 22] entsprechend $2520 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$.

In einer separaten Rechnung wird in Abschnitt 6.4 der Einfluss der spezifischen Energie der Batterie auf den Kraftstoffverbrauch von BEV untersucht. Dazu wird dieser Parameter im Bereich von 100 Wh kg^{-1} bis 250 Wh kg^{-1} in Schritten von 50 Wh kg^{-1} variiert, wobei für jede dieser Vorgaben die Leistungsklassifizierung entsprechend dem in Abschnitt 5.4 erläuterten Verfahren durchgeführt wird.

3.8.2 Brennstoffzellensysteme

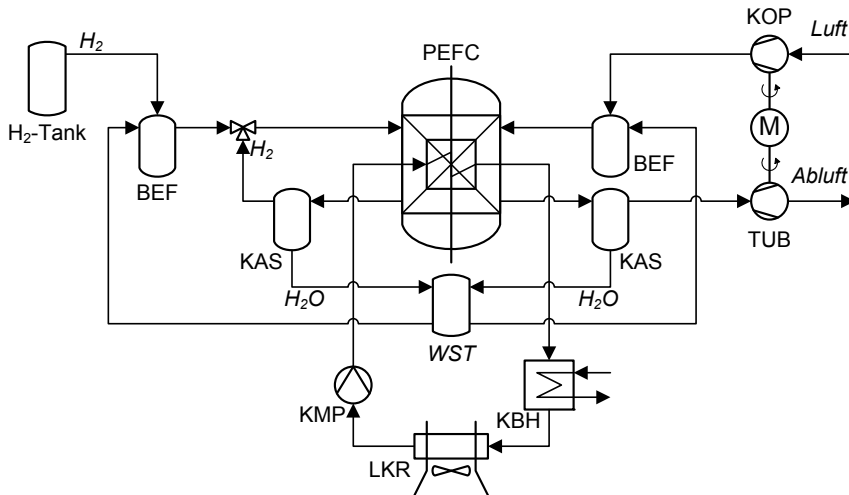
In dieser Arbeit werden Brennstoffzellensysteme mit PEFC (*Polymer electrolyte fuel cell*) gemäß **Bild 3-17** zur Bereitstellung elektrischer Antriebs- und Bordnetzleistung in FCV betrachtet. Die wesentlichen Systemkomponenten sind Wasserstofftank, Brennstoffzellen-(BZ-) Stapel und Einrichtungen des Wasser- und Wärmemanagements.

Für die folgenden Erläuterungen wird davon ausgegangen, dass der erzeugte elektrische Strom gegeben ist. Daraus lassen sich direkt die Wasserstoffumsatzrate, und – bei gegebenem Wasserstoffnutzungsgrad und stöchiometrischem Sauerstoffbedarf – die zuzuführenden Stoffströme von Wasserstoff und Luft berechnen. Auf dieser Grundlage wird die Wärmebilanz des Brennstoffzellenstapels aufgestellt und die rückgewinnbare Kompressionsarbeit am Turbinenteil des Turbokompressors bestimmt. Besondere Randbedingung dabei ist die anoden- und kathodenseitige Gasbefeuchtung die bezüglich der als Verdampfungsenthalpie benötigten Wärme als integraler Bestandteil des BZ-Stapels angesehen wird. Am Austritt des

BZ-Stapels wird Sättigungszustand angenommen, so dass aufgrund der Wasserproduktion auch Kondensationswärme innerhalb des BZ-Stapels berücksichtigt werden muss.

Bild 3-17: Stromerzeugungssystem mit Niedertemperaturbrennstoffzellen vom Typ PEFC.

BEF: Befeuchter; KAS: Kondensatabscheider; KBH: Kabinenheizung; KMP: Kühlmittelpumpe;
KOP: Kompressor; LKR: Luftkühler; PEFC: Polymerelektrolytbrennstoffzelle (Polymer electrolyte fuel cell);
TUB: Turbine; WST: Wassertank



Für die Zusammensetzung der Luft am Eintritt in das System wird in einem vereinfachten Ansatz ein molares Verhältnis von Stickstoff zu Sauerstoff von $x_{N_2/O_2}^{mol} = 3,76$ angesetzt. Die enthaltene Wassermenge ergibt sich aus den gewählten Umgebungsbedingungen (vgl. Tab. 3-7, S. 29).

Die zur Befeuchtung des Wasserstoffs und der Luft notwendige Wassermenge $\Delta \dot{n}_{H_2O}$ wird für Anode und Kathode gemäß Gleichung 3-37 bestimmt.

$$\Delta \dot{n}_{H_2O} = \frac{C \cdot \dot{n}_{ges}^{\alpha} - \dot{n}_{H_2O,s}^{\alpha}}{1 - C} \quad \text{mit } C = f \cdot \omega \cdot \frac{p_{H_2O,s}}{p_{ges}} \quad (3-37)$$

Erläuterung der Indices:

α (ω)	am Eintritt (Austritt) des Befeuchters
ges	bezogen auf den gesamten Stoffstrom
H_2O,s	Wasser im Sättigungszustand
f	relative Gasfeuchte

Der Sättigungsdruck von Wasser wird temperaturabhängig bestimmt. Die thermodynamischen Daten entstammen [39]. Die Menge an kondensierendem Wasser innerhalb des BZ-Stapels wird in analoger Weise berechnet.

Der Leistungsbedarf des Turbokompressors wird auf Basis der benötigten Luftmenge und des mithilfe der Stoffbilanz an der Kathode errechneten Stoffstroms am Austritt ermittelt.

Letzterer dient der Bestimmung der an der Turbine verfügbaren Leistung. Die Differenz aus Leistungsbedarf des Kompressors und Leistungsangebot der Turbine ergibt die mechanisch aufzubringende Zusatzleistung, aus der unter Annahme eines mittleren Wirkungsgrads des elektrisch betriebenen Antriebsmotors von 90 % die elektrische Leistung bestimmt wird.

Die Ermittlung der nutzbaren Abwärme des Systems erfolgt analog zu Unterabschnitt 3.8.1 mithilfe des folgenden Ansatzes zur Bestimmung der Wärmebilanz des BZ-Stapels.

$$m_{BZ} \cdot c_{BZ} \cdot \frac{dT_{BZ}}{dt} = \sum \dot{Q}_{i,BZ} \quad \text{mit } \sum \dot{Q}_{i,BZ} = \dot{Q}_{elc} + \Delta \dot{H}_{BZ} - \dot{Q}_{bft} + \dot{Q}_{kds} - \dot{Q}_{str} - \dot{Q}_{KLM} \quad (3-38)$$

Erläuterung der Indices:

<i>BZ</i>	Brennstoffzellenstapel
<i>elc</i>	bezogen auf die elektrochemische Reaktion
<i>bft</i>	bezogen auf Gasbefeuchtung (im BZ-Stapel)
<i>kds</i>	bezogen auf Kondensation (im BZ-Stapel)
<i>str</i>	bezogen auf Strahlung
<i>KLM</i>	Kühlmittel

Die Gesamtenthalpiedifferenz $\Delta \dot{H}_{BZ}$ ist die Summe der Enthalpiedifferenzen der *k* Gasmischkomponenten:

$$\Delta \dot{H}_{BZ} = \sum_{i=1}^k \Delta \dot{H}_i = \sum_{i=1}^k \dot{n}_i^\omega \cdot h_i^\omega - \dot{n}_i^\alpha \cdot h_i^\alpha \quad (3-39)$$

\dot{n}_i^α \dot{n}_i^ω	Stoffstrom der Komponente <i>i</i> am Eintritt Austritt [<i>mol s</i> ⁻¹]
h_i^α h_i^ω	spezifische Enthalpie der Komponente <i>i</i> am Eintritt Austritt [<i>J mol</i> ⁻¹]

Mithilfe der Verdampfungswärme von Wasser werden die Wärmeströme der Verdampfung \dot{Q}_{bft} und Kondensation \dot{Q}_{kds} bestimmt. Der Wärmeübergang durch Strahlung \dot{Q}_{str} wird wiederum gemäß [86, S. D35]: ermittelt:

$$\dot{Q}_{str} = \dot{Q}_{12} = C_{12} \cdot A_{BZ} \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (3-40)$$

C_{12}	Strahlungsaustauschkoeffizient
A_{BZ}	BZ-Stapeloberfläche
T_1	Oberflächentemperatur
T_2	Umgebungstemperatur

Die Temperatur des BZ-Stapels wird mithilfe eines Regelkreises durch Variation des Kühlmittelmassenstroms und damit des zugehörigen Wärmestroms \dot{Q}_{KLM} geregelt. Die Temperatur des Kühlmittels am Eintritt des BZ-Stapels wird mit 10 K oberhalb der Umgebungstemperatur und die Austrittstemperatur mit der BZ-Stapeltemperatur angesetzt. Nach Umstellen von Gleichung 3-38 lässt sich die Temperatur des BZ-Stapels bestimmen mit:

$$T_{BZ} = \frac{1}{m_{BZ} \cdot c_{BZ}} \int (\dot{Q}_{elc} + \Delta \dot{H}_{BZ} - \dot{Q}_{bft} + \dot{Q}_{kds} - \dot{Q}_{str} - \dot{Q}_{KLM}) dt + T_{BZ,0} \quad (3-41)$$

Die Anfangstemperatur $T_{BZ,0}$ wird mit der Betriebstemperatur von 80°C angesetzt.

Zur Abbildung des Strom-Spannungsverhaltens des Brennstoffzellenstapels kommt ein Kennlinienmodell mit der Stromdichte als Eingangsgröße zur Anwendung. Der Zusammenhang zwischen der Stromdichte i_{BZ} und dem umgesetztem Wasserstoff $\dot{n}_{H_2,u}$ ergibt sich aus der Proportionalität von umgesetzter Stoffmenge und elektrischer Ladung nach dem ersten Faraday'schen Gesetz und der Definition des elektrischen Stroms zu:

$$i_{BZ} = \frac{\dot{n}_{H_2,u} \cdot z \cdot F}{A_{BZ}} \quad (3-42)$$

i_{BZ}	Stromdichte
$\dot{n}_{H_2,u}$	umgesetzte Stoffmenge
z	Ladungszahl je Molekülumsatz ($z = 2$ für Wasserstoff)
F	Faraday-Konstante ($F = 9,6488 \cdot 10^4 \text{ As mol}^{-1}$)
A_{BZ}	Aktive Fläche des Brennstoffzellenstapels

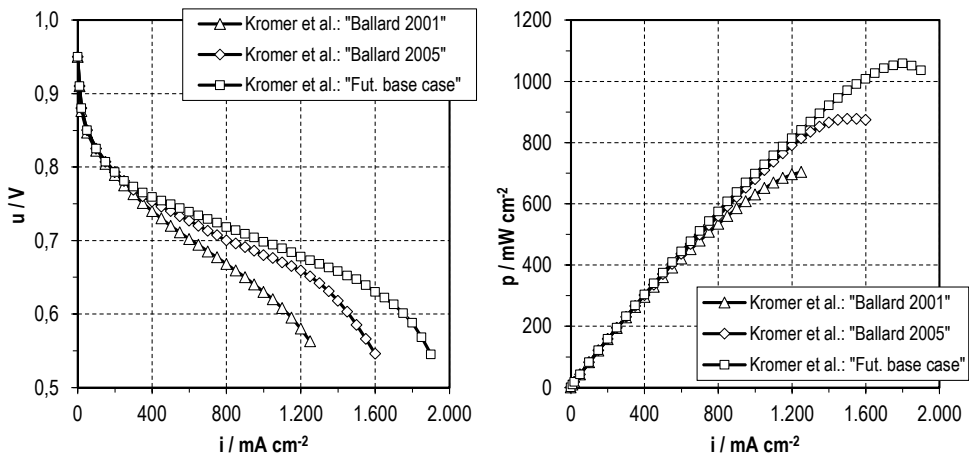
In der Literatur verfügbare Stromdichte-Spannungskurven sind in **Bild 3-18** (links) abgebildet. Im rechten Diagramm sind die zugehörigen Leistungsdichten dargestellt.

Bild 3-18: Betriebsverhalten von PEFC für Fahrzeuganwendungen.

Links: Zellspannung in Abhängigkeit der Stromdichte.

Rechts: Leistungsdichte in Abhängigkeit von der Stromdichte.

Fut. base case: Future base case; Quelle: Kromer et al. (2008) [15].



Die abgebildeten Kennlinien laut Kromer et al. (2008) [15] dokumentieren den Entwicklungsfortschritt mit Bezug auf Wirkungsgrad und Strom- beziehungsweise Leistungsdichte im Zeitraum von 2001 bis 2005. Für den Zeithorizont 2030 wird mit dem „Future base

case“ eine Projektion des weiteren Fortschritts vorgenommen, jedoch der Status 2005 („Ballard 2005“) als konservatives Szenario in die Analyse übernommen.

Für die Analyse in dieser Arbeit werden, vergleichbar zum Vorgehen in [15], mit der Kennlinie „Ballard 2005“ [15] der heutige Stand der Technik für das Szenario „Standard“ und mit der Kennlinie „Future base case“ [15] eine bezüglich der weiteren Entwicklung optimistische Variante für das Szenario „Zukunft“ gewählt.

Die Skalierung des BZ-Systems erfolgt nach Vorgabe der elektrischen Nennleistung des Brennstoffzellenstapels mithilfe der Leistungsdichte im Punkt maximaler Leistung (siehe **Bild 3-18, rechts**). Der Betriebsdruck beträgt $2,0 \text{ bar}$ im Auslegungspunkt. Der Kathodenluftkompressor wird am Hochspannungsbordnetz betrieben, alle weiteren Nebenverbraucher hingegen am 14 V -Bordnetz.

Für die Wasserstoffspeicherung wird von einem Drucktank mit einem Betriebsdruck von 700 bar ausgegangen. Die spezifische Energie wird mit $1,8 \text{ kWh kg}^{-1}$ angesetzt. Dies entspricht dem Entwicklungsziel des US Department of Energy (DOE) für das Jahr 2017 [87]. Laut Spezifikation eines Tanks mit 5 kg nutzbarer Wasserstoffmenge bei einer Tankmasse von 92 kg wird dieser Wert bereits heute erreicht [88].

3.8.3 Gleichspannungswandler

Wie im Abschnitt 3.5 bereits angedeutet, erfordert das mit der Verbrauchsreduktion vorgegebene Ziel der Optimierung von Lastflüssen im Gesamtfahrzeug eine möglichst flexible Steuerung elektrischer Leistungen. In diesem Zusammenhang wird zwischen aktiven und passiven Hybriden unterschieden [89]. Charakteristisches Merkmal passiver Hybridsysteme ist die direkte Kopplung von elektrischer Energiequelle und elektrischem Speicher. Bei aktiven Hybridsystemen besteht eine indirekte Kopplung über einen Gleichspannungswandler (GW), dessen Steuerung einen Eingriff in den Lastfluss ermöglicht [80, 89, S. 37ff.]. Diese Variante wird hier ausgewählt.

Gleichspannungswandler sind leistungselektronische Schaltungen zur Übertragung elektrischer Leistungen zwischen Gleichstromsystemen unterschiedlicher Spannung. Sie werden auch als Gleichstromumrichter oder Gleichstromsteller bezeichnet [90, S. 437, 91, S. 237]. Das Funktionsprinzip beruht auf periodischen Schaltvorgängen, die einen Verbraucher und eine Gleichspannungsquelle verbinden beziehungsweise trennen. Der Verbraucher enthält dabei mindestens eine Induktivität als dynamisches Element, über die bei geöffnetem Schalter der Stromfluss entsprechend der Zeitkonstante abklingt. Eine Freilaufdiode bewirkt bei geschlossenem Schalter einen Kurzschluss des Verbrauchers, verhindert aber bei geöffnetem Schalter den Kurzschluss der Spannungsquelle. Mithilfe der Dimensionierung der Induktivität im Verhältnis zum Ohm'schen Widerstand des Verbrauchers kann ein nahezu konstanter Strom am Verbraucher erzielt werden. [90, S. 438]

In dieser Arbeit wird die Beziehung zwischen Ein- und Ausgang von GW mithilfe des Wirkungsgrads (siehe **Bild 3-19**) hergestellt:

$$P_{GW}^{\omega} = P_{GW}^{\alpha} \cdot \eta_{GW} \quad (3-43)$$

$P_{GW}^{\omega} \mid P_{GW}^{\alpha}$ Ausgangs- beziehungsweise Eingangsleistung des GW
 η_{GW} Wirkungsgrad des GW

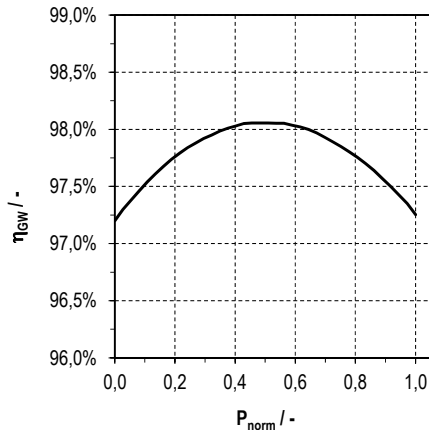
Die konkreten Spannungslagen werden nicht betrachtet. Der Wirkungsgrad des GW wird abhängig von der normierten Leistung als Kennlinie abgebildet. Je nach Einsatzfall kommen zur Anwendung:

- Hoch- beziehungsweise Tiefsetzsteller zur Kopplung der Brennstoffzelle,
- bi-direktionale GW zur Kopplung der Batterie.

Das Betriebsverhalten wird für alle Varianten gleichgesetzt.

Bild 3-19: Betriebsverhalten eines Gleichspannungswandlers.

Hier als Hochsetzsteller auf der Basis von Daten in [92, S. 36]; dort angegebene Werte auf den gesamten Betriebsbereich extrapoliert; **GW**: Gleichspannungswandler, **norm**: normiert.



Zur Bestimmung der Masse der GW wird der Mittelwert aus den in [93, S. 44] angegebenen Werten für Toyota Camry und Toyota Prius von 3,9 beziehungsweise 4,2 $kW\ kg^{-1}$ angesetzt.

3.8.4 Thermoelektrische Generatoren (TEG)

Die Funktionsweise thermoelektrischer Generatoren (TEG) beruht auf dem als Seebeck-Effekt bekannten Phänomen der Ausprägung von Thermospannungen bei Materialpaaren mit verschiedenen starken Thermodiffusionsströmen, wenn die Verbindungsstellen der Materialien unterschiedlichen Temperaturen ausgesetzt sind [94, 95]. Dieser thermoelektrische Wandlungsprozess wird überwiegend in Thermoelementen zur Temperaturmessung oder auch als Stromquelle in der Raumfahrt genutzt [96, 97]. In der Automobilindustrie werden Ansätze zur Rückgewinnung thermischer Energie aus Verbrennungsprozessen verfolgt [98]. Dazu sollen Temperaturunterschiede im Abgasstrang [99, 100, 101, 102] oder in der Abgasrückführung (AGR) von Dieselmotoren [103] zur Stromerzeugung genutzt werden. Ausge-

hend von heute im Labor erreichten Wirkungsgraden von bis zur 14 % wird das Wirkungsgradpotential mit 17 % bis 20 % angegeben [96]. Erzielbare Leistungen liegen im Fahrzeugeinsatz heute bei bis zu $200 W_e$ für einen Forschungsdemonstrator laut [99], bis zu $300 W_e$ laut [100], bis zu $450 W_e$ laut [102] und bis zu $425 W_e$ laut [101]. Letztere Angabe wird als Potential angegeben für einen dort entwickelten Demonstrator mit der Annahme weiter verbesserter Material- und Wärmeübertragungseigenschaften. Die Werte beziehen sich auf Pkw des J-Segments (Geländefahrzeuge einschließlich *Sport utility vehicle*, SUV) bei höheren Motorleistungen. Das Verbrauchsreduktionspotential beträgt laut [102] zwischen 0,7 % bei einer Geschwindigkeit von 50 km h^{-1} und 1,3 % bei 120 km h^{-1} . Diesen Werten liegen stationäre Betriebszustände zugrunde. In [103] werden Verbrauchsreduktionspotentiale zwischen 2 % und 5 % genannt. Letzterer Wert gilt für einen Pkw des D-Segments bei einer konstanten Geschwindigkeit von 130 km h^{-1} und unter der Voraussetzung, dass zukünftig in dieser Fahrsituation 1 kW_e durch TEG bereitgestellt werden können. Das Reduktionspotential von 2 % gilt für die Bereitstellung von $250 W_e$ bei nicht näher definierten Fahrzuständen oder Fahrzyklen.

Mit dem hier verwendeten Verbrennungsmotormodell ist eine Bestimmung der Abgastemperatur nicht möglich. In der Berechnungsvariante „Zukunft“ in Unterabschnitt 6.1 wird daher zur Einbeziehung des Betriebs von TEG als optimistische Annahme eine an den VM-Betrieb gekoppelte, konstante Stromerzeugung in ICV und PAH berücksichtigt. In einer zusätzlichen Rechnung erfolgt, ebenfalls in der Berechnungsvariante „Zukunft“ eine Berechnung ohne TEG. Da in dieser Arbeit Pkw des A- und C-Segments betrachtet werden, wird für die Berechnungen von einer im Vergleich zu den oben genannten Werten geringeren Einspeisung aus TEG von $200 W_e$ in das 14 V-Bordnetz ausgegangen. Eine veränderte Dimensionierung der motorgekoppelten Stromerzeugung wird nicht vorgenommen. Bei Leistungsüberschuss aus TEG und Photovoltaikmodulen (siehe Unterabschnitt 3.8.5) erfolgt keine Übertragung ins Hochspannungsnetz.

Mithilfe von Peltier-Elementen wird in Umkehrung des oben beschriebenen Prozesses Wärme oder Kälte aus elektrischer Energie erzeugt. Anwendungen in der Automobiltechnik könnten zukünftig in der Katalysatorbeheizung liegen [104]. Bereits heute werden Peltier-Elemente in Getränkehaltern eingesetzt [105]. Peltier-Elemente werden in dieser Arbeit nicht betrachtet.

3.8.5 Photovoltaikmodule

Zur Ergänzung der Stromversorgung in Pkw können Photovoltaik- (PV-) Module in Karosserieaußenflächen integriert werden. Solche Systeme sind heute als Dacheinbauten erhältlich [106, 107]. Für Fahrzeuge, die beispielsweise im Mobilitätskonzept *car2go*¹ betrieben werden, sind PV-Module mit einem Wirkungsgrad von 17,5 % verfügbar [109]. Die maximale

¹ *car2go* ist eine Marke der Daimler Mobility Services GmbH und beinhaltet das Angebot von *Carsharing*-Dienstleistungen [108].

Leistung liegt bei $100 W_e$. In dieser Arbeit wird zur Abschätzung des Potentials dieser Technik im Rahmen des Szenarios „Zukunft“ von der Nutzung der gesamten Dachfläche und dem genannten Wirkungsgrad ausgegangen. Dachfläche und Strahlungsleistung ergeben sich aus den Definitionen im Abschnitt 3.6. Damit betragen die maximalen elektrischen Leistungen für Pkw des A-Segments mit $1,0 m^2$ beziehungsweise des C-Segments mit $1,7 m^2$ Dachfläche rund $180 W_e$ beziehungsweise $300 W_e$, wenn die Globalstrahlung mit dem maximalen Wert von $1000 W m^{-2}$ angenommen wird. Die bereitgestellte elektrische Leistung reduziert in dieser Arbeit analog zur Betrachtung thermoelektrischer Generatoren den Leistungsbedarf im 14 V-Bordnetz. Auch diese Untersuchung erfolgt als Bestandteil der Berechnungsvariante „Zukunft“ für alle Konzepte (siehe Szenariendefinition im Abschnitt 6.1), jedoch nur im Bordnetzlastfall „Sommertag“ (SOT, siehe Abschnitt 3.6) In analoger Weise zur Bewertung des Potentials von TEG (siehe Unterabschnitt 3.8.4) wird auch hier eine zusätzliche Rechnung im selben Bordnetzlastfall jedoch ohne Einspeisung aus dem PV-Modul durchgeführt. Für den Fall, dass die Einspeisung aus TEG (siehe vorheriger Unterabschnitt) und Photovoltaik den aktuellen Leistungsbedarf im 14 V-Bordnetz übersteigt, wird eine Übertragung überschüssiger Leistung ins Hochspannungsbordnetz nicht betrachtet.

3.9 Fazit

In Kapitel 3 dieser Arbeit wurde in den Abschnitten 3.1 bis 3.6 das Vorgehen zur Ermittlung mechanischer, elektrischer und thermischer Lastprofile einschließlich der zugehörigen Gleichungsmodelle festgelegt. Maßgeblich für die mechanischen Lastprofile sind die zur Verfügung stehenden Fahrzyklen, die sich in Stadt-, Überland- und Autobahnfahrten unterteilen lassen. Die darin festgelegten Geschwindigkeitsprofile werden mithilfe eines die Fahrzeuglängsdynamik beschreibenden Simulationsmodells und unter Nutzung Pkw-segment-spezifischer Parameter in die erforderlichen Antriebsmomente umgesetzt.

Die Dimensionierung des Antriebsstrangs mithilfe der Methoden, die im Abschnitt 3.2 beschrieben wurden, orientiert sich einerseits an den Anforderungen, die mit der Erfüllung grundlegender Fahrleistungen zusammenhängen. Andererseits wurden rechnerisch einfach zu handhabende Verfahren ausgewählt, die ausgehend von den verfügbaren Designkriterien eine flexible Dimensionierung relevanter Parameter ermöglicht. Dies betrifft besonders die Ermittlung der Übersetzungen von Getriebe und Achsantrieb, wobei erstere in geometrischer Abstufung bestimmt werden.

Besondere Beachtung wurde der Ermittlung des zeitabhängigen Leistungsbedarfs der Nebenverbraucher gegeben. Während in der Literatur häufig von zeitkonstanten Werten ausgegangen wird, wurden hier – in einheitlicher Vorgehensweise für alle untersuchten Konzepte – zunächst zeitkonstante und zeitabhängige Lastprofile typischer Bordnetzverbraucher des 14 V-Bordnetzes bestimmt. Thermische Lastprofile wurden bei PAH, FCV und BEV in elektrische Lastprofile überführt. Damit einher geht auch die Definition von Zweispannungsbordnetzen, da die maximale Leistungsaufnahme der Kabinenklimatisierung im

Bereich mehrerer Kilowatt liegt. Heizelement und Klimakompressor müssen daher zur Reduktion der Ströme in Hochspannungsnetzen betrieben werden. Für die Kabinenklimatechnik ermittelte maximale Leistungsbedarfe liegen bei $4,3 \text{ kW}_e$ im Heizfall und $2,2 \text{ kW}_e$ im Kühlfall. Diese Werte gelten unter den im Abschnitt 3.6 definierten Randbedingungen. Bei FCV wird zusätzlich der Kathodenluftkompressor am Hochspannungsbordnetz betrieben. Dessen Leistungsaufnahme liegt im Auslegungspunkt bei etwa 12 % der Brennstoffzellenleistung.

Im zweiten Teil von Kapitel 3 in den Abschnitten 3.7 und 3.8 wurden die zur Leistungsabdeckung einzusetzenden Energiewandler bestimmt und bezüglich ihres Betriebsverhaltens charakterisiert. Für die Teilmodelle der Antriebsmaschinen wurden Betriebskennfelder und für Brennstoffzellenstapel und Stromwandler Betriebskennlinien definiert. Diese das Verhalten der Komponenten in Abhängigkeit von der Last beschreibenden Datenstrukturen sind als skalierbare Kennfelder beziehungsweise Kennlinien im Simulationsmodell hinterlegt und bilden die Basis des im Abschnitt 5.4 beschriebenen Vorgehens zur Skalierung der Systemkomponenten.

Weiterhin wurde ein mithilfe von Messdaten aus der Literatur parametrisiertes Ersatzschaltbild zur Abbildung des Betriebsverhaltens von Batterien erläutert. Mit dessen Hilfe können Spannungsverläufe in Abhängigkeit der Lade- und Entladeströme dargestellt werden. Für BEV ist das Erreichen der Entladeschlussspannung als Kriterium bei der Ermittlung der Reichweite relevant. Die Temperaturabhängigkeit der Batteriespannung wurde mit Blick auf zukünftige Anwendungen der Modelle bereits integriert, wird jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht verwendet, da das Kaltstartverhalten nicht Gegenstand dieser Analyse ist.

Für die im weiteren Verlauf definierten Szenarien des Betriebs der untersuchten Pkw wurden auch weitere Stromerzeugungstechnologien betrachtet. Dies sind thermoelektrische Generatoren im Abgasstrang von Pkw mit Verbrennungsmotor (ICV und PAH) und Photovoltaik- (PV-) Kollektoren für alle untersuchten Konzepte. Thermoelektrische Generatoren nutzen Temperaturdifferenzen im Abgasstrang von Verbrennungsmotoren und werden für die hier untersuchten Pkw-Konzepte mit einheitlicher, aber an den Betrieb des Verbrennungsmotors gekoppelter Leistung angenommen. Für PV-Kollektoren wurde die gesamte Dachfläche angenommen. Die bereitgestellten Leistungen wurden mit maximal 200 W_e im Falle der TEG und mit maximal 300 W_e im Falle von PV-Modulen festgelegt.

4 Stromnutzung in Pkw-Antrieben

Ausgehend vom Referenz-Pkw mit Verbrennungsmotor (ICV) stellen die in dieser Arbeit untersuchten Pkw-Konzepte unterschiedliche Wege dar, den Kraftstoffverbrauch durch die Nutzung elektrischer Leistung im Antrieb zu senken. Die aus Tab. 1-1 (S. 6) ersichtlichen Antriebstopologien eröffnen dafür zusätzliche Freiheitsgrade des Betriebs von Antriebskomponenten. Auf diese Weise können konzeptspezifische Funktionen ausgeführt werden, die im Rahmen einer Betriebsstrategie auf festgelegte Optimierungskriterien ausgerichtet sind. Diese Funktionen bilden die Grundlage der in den Simulationsmodellen umgesetzten Steuerungsfunktionen zur Optimierung des Kraftstoffverbrauchs (siehe Kapitel 5). In diesem Kapitel werden im Abschnitt 4.1 die im Zusammenhang mit dieser Arbeit relevanten Funktionen spezifiziert und anschließend in den Abschnitten 4.2 bis 4.5 den untersuchten Pkw-Konzepten zugeordnet. Zunächst werden jedoch einige einführende Erläuterungen zu den Optionen der Verbrauchsreduzierung mithilfe der Hybridisierung als notwendig erachtet.

4.1 Verbrauchsreduktion durch Hybridisierung

Trotz hohen Entwicklungsstands von Verbrennungsmotoren für ICV besteht eine große Diskrepanz zwischen maximalem Wirkungsgrad im Motorbestpunkt und mittleren Wirkungsgraden in realen Fahrprofilen. Eine der wesentlichen Ursachen besteht in den für realistische Fahrprofile typischen Lastkollektiven von Verbrennungsmotoren, die auslegungsbedingt häufig im Bereich kleiner und sehr kleiner Teillast, einschließlich des Motorleerlaufs liegen. Darüber hinaus führt der zeitabhängige Fahrzustand gemäß Drehmoment-Geschwindigkeitsdiagramm nur zu einer geringen Beeinflussbarkeit des Betriebszustandes der Antriebsmaschine, die in heute eingesetzten Getrieben in der Wahl der Gangstufe und damit der Übersetzung besteht.

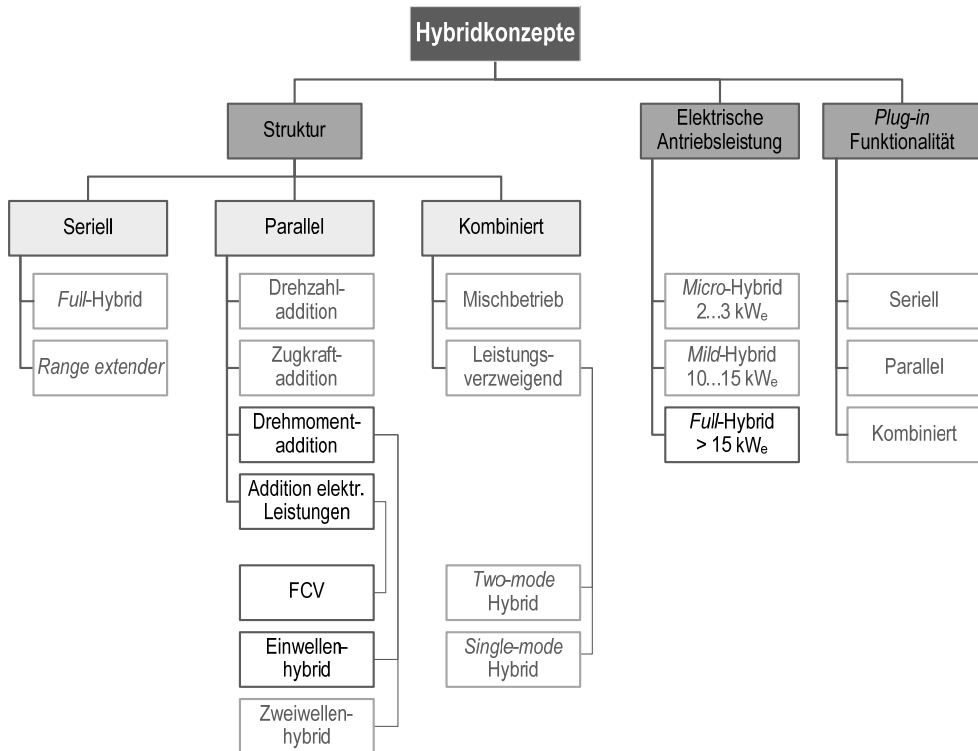
Einen Lösungsansatz stellt die Entwicklung von Hybridkonzepten dar. Im Vergleich zu ICV (siehe Bild 4-3, S. 65) bedeutet dies die Ergänzung der Antriebstopologie um weitere Energiewandler und -speicher. Durch eine gezielte Ansteuerung der Systemkomponenten im Rahmen einer definierten Betriebsstrategie können auf diese Weise Betriebszustände variiert und damit Betriebszeiten in wirkungsgradungünstigen Bereichen reduziert werden. Zusätzlich wird die im Folgenden als rekuperatives Bremsen (RKB) bezeichnete Rückgewinnung von Bremsenergie möglich. Aktuell für Serienfahrzeuge entwickelte Hybridkonzepte nutzen hauptsächlich Elektromaschinen in Verbindung mit Batterien.

Für Elektro-Pkw mit Brennstoffzellen (FCV) entsteht ein Hybridsystem bereits durch den Einsatz eines elektrischen Speichers, der neben der Aufnahme rekuperativer Bremsleistung einer verbesserten Dynamik des Gesamtsystems dient und dessen Betriebsweise wirkungsgradungünstige Betriebszustände des Brennstoffzellensystems möglichst vermeidet. Für Elektro-Pkw mit Batterie (BEV) könnte eine Hybridisierung durch Einsatz eines weiteren elektrischen Speichers, zum Beispiel eines Superkondensators realisiert werden. Ein solches Konzept wird in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Wesentliche Merkmale, nach denen Hybridkonzepte klassifiziert werden, sind Antriebsstruktur, elektrische Antriebsleistung und *Plug-in* Funktionalität. **Bild 4-1** gibt dazu einen Überblick. An anderer Stelle wird die elektrische Leistung des Antriebs auch auf die Fahrzeugmasse bezogen [110, S. 70].

Bild 4-1: Klassifizierung von Hybridkonzepten.

Eigene Darstellung nach [56, S. 17-19, 110, S. 67]. Konzepte mit schattierter Schriftart sind nicht Bestandteil der Analyse.



Insbesondere für Parallelhybride (PAH) ist nachfolgend der Hybridisierungsgrad α_H von Bedeutung und wird in dieser Arbeit in Anlehnung an [111, S. 29] gemäß Gleichung 4-1 definiert:

$$\alpha_H = \frac{P_{EM,nom}^m}{P_{VM,nom}^m + P_{EM,nom}^m} = \frac{P_{EM,nom}^m}{P_{ges,nom}^m} \quad (4-1)$$

$P_{EM,nom}^m$ Mechanische Nennleistung der Elektromaschine im Motorbetrieb

$P_{VM,nom}^m$ Mechanische Nennleistung des Verbrennungsmotors

$P_{ges,nom}^m$ Summe der Nennleistungen des Antriebs

In der vorliegenden Arbeit wird der Einwellenhybrid als Parallelhybrid betrachtet. Dieser ist durch die Positionierung der Elektromaschine auf der Getriebeeingangswelle gekennzeichnet.

net. Bei Zweiwellenhybriden wirken Verbrennungsmotor und Elektromaschine auf Einbeziehungswise Ausgangswelle des Getriebes. Die detaillierte Beschreibung der in dieser Arbeit definierten Konzepte ist in den Abschnitten 4.2 bis 4.5 zu finden.

4.1.1 Funktionalitäten der Antriebskonzepte

Verbrauchsvorteile, die durch Hybridisierung erzielt werden, lassen sich auf die Nutzung konzeptspezifischer Funktionen zurückführen, die durch Freiheitsgrade aufgrund der Topologie des Antriebs und der Dimensionierung seiner Komponenten bestimmt sind. Diese Funktionen werden nun – bezogen auf die hier betrachteten Pkw-Konzepte – zu konzeptspezifischen Funktionsgruppen, die im Weiteren als Funktionalitäten bezeichnet werden, zusammengeführt. **Tab. 4-1** gibt dazu eine Übersicht. Die nachfolgenden Erläuterungen bilden die Grundlage der im Rahmen der Modellerstellung zu entwickelnden Betriebsstrategien und beziehen sich überwiegend auf das PAH-Konzept, dessen Antriebsstruktur und Betriebsstrategie im Vergleich zu ICV, BEV und FCV deutlich komplexer ist.

Tab. 4-1: Funktionalitäten der analysierten Fahrzeugkonzepte.

Rein verbrennungsmotorisches (VM-) Fahren und batterieelektrisches (BE-) Fahren sowie Lastpunkthanhebung (LPA), Lastpunktreduktion (LPR), Betriebspunktverschiebung (BPV) und rekuperatives Bremsen (RKB) sind im Zusammenhang mit dieser Arbeit gewählte Funktionsnamen; Funktionen nach [56, S. 207-209].

Funktion	ICV	PAH	BEV	FCV
Stopp-Start	■	■	■	■
RKB	□	■	■	■
Boost-Betrieb	□	■	□	■
LPA/ LPR/ BPV	□/□/■	■/■/■	□/□/■	■/■/■
BE-Fahren	□	■	■	■
VM-Fahren	■	■	□	□

Legende: ■ verfügbar; □ nicht verfügbar

Die **Stopp-Startfunktion** beinhaltet bei ICV und PAH das Abstellen des VM bei Fahrzeugstillstand. Bordnetzverbraucher werden dann durch die Batterie versorgt. Diese Funktion kann je nach konkreter technischer Ausführung an unterschiedliche Bedingungen geknüpft sein. Solche Bedingungen können zum Beispiel Außen- und Kühlmitteltemperatur, Ladezustand (*State of charge*, SOC) der Batterie oder eine Grenzggeschwindigkeit sein. In der technischen Umsetzung finden sich bei verbrennungsmotorbasierten Konzepten Anlasser größerer Leistung beziehungsweise Starter-Generatoren und Batterien mit größerer Kapazität. Knorr (2011) beziffert die Kraftstoffeinsparung im MVEG-Fahrzyklus mit 5 bis 7 % [41].

Beim **Rekuperativen Bremsen (RKB)** wird in Verzögerungsphasen Bremsenergie über einen mechanisch-elektrischen Antriebspfad in die Batterie eingespeist oder dem Bordnetz zur Verfügung gestellt. Diese Funktion ist heute teilweise auch bei ICV mithilfe einer intel-

ligenten Generatorsteuerung verfügbar. Ein solches System wird in dieser Arbeit nicht betrachtet, so dass RKB bei PAH, BEV und FCV berücksichtigt wird. Der theoretische Maximalwert der rekuperierbaren Energie entspricht der kinetischen Energie des Pkw. Der nutzbare Anteil der Rekuperationsenergie liegt deutlich unter diesem Wert, weil

- auch die Fahrwiderstände $F_{w,R}$, $F_{w,L}$ verzögernd wirken,
- die an der nicht angetriebenen Achse erforderliche Bremsleistung mithilfe der mechanischen Betriebsbremse in Wärme umgewandelt wird,
- Verluste in der Wirkungsgradkette vom Rad bis zur Batterie zu berücksichtigen sind,
- abhängig vom Geschwindigkeitsgradienten und den Betriebsgrenzen von Generator und Batterie nicht die gesamte Verzögerungsleistung aufgenommen werden kann.

Duval-Destin et al. (2011) unterscheiden zwischen überlagernden und verblendenden Systemen [112]. Überlagernde Systeme überlagern die Verzögerungswirkungen der hydraulischen Reibungsbremse und der Elektromaschine. Eine Verblendung der Verzögerungswirkung wird mithilfe kooperativ-rekuperativer Bremssysteme vorgenommen. Bei deutlich höherem technischen Aufwand sind solche Systeme für Antriebe mit elektrischen Leistungen von mehr als 20 kW_e geeignet. In dieser Arbeit wird von kooperativ-rekuperativen Systemen ausgegangen. Es wird stets die höchstmögliche Leistung in den elektrischen Pfad eingebracht, wobei die maximale Rekuperationsleistung durch die Betriebsbereiche von Generator und Batterie und je nach Fahrsituation auch durch Fahrstabilitätskriterien begrenzt ist. Zur Berücksichtigung der maximal möglichen Rekuperationsleistung wird die Entkopplung des VM vom Triebstrang angenommen. Die erzeugte elektrische Leistung wird den Nebenverbrauchern und der Batterie zugeführt.

Mithilfe der **Boost-Funktion** wird die Zugkraft des Antriebs durch Addition des Drehmoments einer Elektromaschine zu dem des Verbrennungsmotors erhöht. Damit lassen sich verbesserte Beschleunigungswerte erzielen oder eine zu geringe Dynamik der Antriebsmaschine ausgleichen [56, S. 232]. Begrenzend wirkt sich hier der Batterieladezustand aus, das heißt, diese Funktion steht nur während eines durch die Batteriekapazität begrenzten Zeitraums zur Verfügung. Für Steigungsfahrten oder Anhängerbetrieb ist die Boost-Funktion daher unter Umständen nicht geeignet. Für FCV bedeutet diese Funktion die Addition der elektrischen Leistungen von Batterie und Brennstoffzellensystem.

Lastpunktanhebung (LPA) ist die Erhöhung des VM-Drehmoments durch Addition des Lastmoments einer als Generator betriebenen Elektromaschine (EM1). Die erzeugte elektrische Leistung kann direkt im Bordnetz oder für eine zeitverzögerte Nutzung im Antrieb beziehungsweise Bordnetz zwischengespeichert werden. Die zuletzt genannte Option bedarf der Zwischenspeicherung, die ihrerseits verlustbehaftet ist und durch den notwendigen Speicher die Berücksichtigung einer erhöhten Fahrzeugmasse erfordert. Auch bei FCV kann eine Anhebung des Lastpunktes zu einem höheren Wirkungsgrad führen. LPA wird auch dann eingesetzt, wenn der Ladezustand des elektrischen Speichers dessen Nachladung erfordert. Die Steuerung der Funktion folgt aus der gewählten Betriebsstrategie (siehe Unterabschnitt 4.1.2).

Bei der **Lastpunktreduktion (LPR)** wird das VM-Drehmoment mithilfe einer motorisch betriebenen Elektromaschine abgesenkt [56]. Diese Funktion spielt aufgrund der Kennfeldcharakteristik von VM bei der Verbrauchsoptimierung kaum eine Rolle und wird nur eingesetzt, wenn das Speichermanagement eine Reduktion des SOC notwendig macht.

Betriebspunktverschiebung (BPV) wird bei allen Konzepten mit variabler Übersetzung als Optimierungsverfahren eingesetzt. Abhängig vom Fahrzustand wird, bei gleicher Verbrennungsmotorleistung, diejenige Übersetzung gewählt, die unter Beachtung der Betriebsgrenzen des Verbrennungsmotors zum geringsten Kraftstoffverbrauch führt.

Batterieelektrisches (BE-) Fahren wird bei Verbrennungsmotor-HEV und bei *Plug-in* Hybriden (PHEV) auf Fahrerwunsch aktiviert, kann aber auch als Teil der Betriebsstrategie zur Absenkung des Ladezustands des elektrischen Speichers dienen.

Verbrennungsmotorisches (VM-) Fahren wird angewandt, wenn die Nutzung von BE-Fahren und LPA nicht realisierbar oder hinsichtlich des Kraftstoffverbrauchs nicht vorteilhaft ist.

4.1.2 Festlegung der Betriebsstrategie

In dieser Arbeit bestimmen konzeptspezifische Betriebsstrategien Art und Weise des Betriebs der Energiewandler und -speicher und damit deren Betriebszustände. Bei ICV bestimmt die Wahl der Gangstufe Drehzahl und Drehmoment des Verbrennungsmotors und damit den spezifischen Kraftstoffverbrauch. In Hybridkonzepten werden zusätzliche Freiheitsgrade der Komponentensteuerung mithilfe der in Unterabschnitt 4.1.1 definierten Funktionen zur Optimierung des Gesamtantriebs genutzt. Gemäß der Aufgabenstellung ist in dieser Arbeit die Minimierung des Kraftstoffverbrauchs als einheitliches Optimierungsziel für alle untersuchten Konzepte festgelegt. Andere Aspekte, wie beispielsweise Fahrbarkeit, Fahreindruck und Fahrkomfort, Geräuschemissionen sowie die Einhaltung von Abgasgrenzwerten, die ebenfalls durch Betriebsstrategien beeinflussbar sind, werden nicht betrachtet.

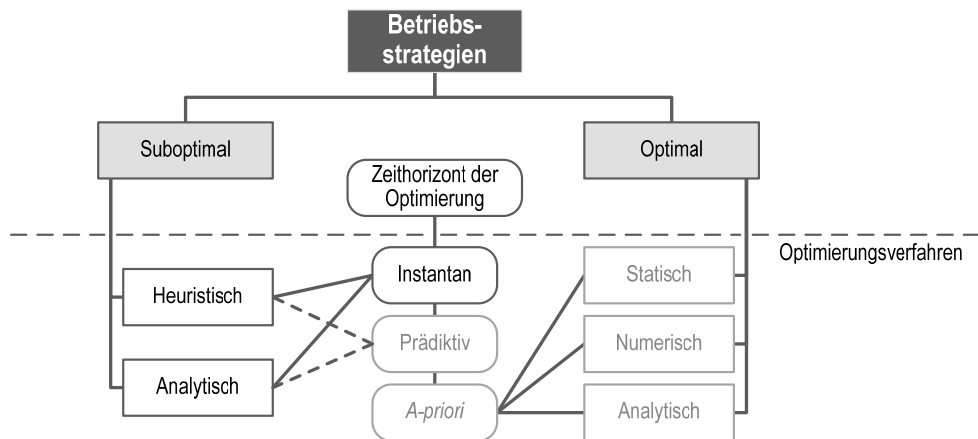
Klassifizierungen von Betriebsstrategien werden in der Literatur unterschiedlich vorgenommen. **Bild 4-2** gibt eine Übersicht auf Basis von Angaben in Hofmann (2010) [56] und Guzella et al. (2007) [113]. Letztere unterscheiden zwischen nicht-kausalen und kausalen Betriebsstrategien [113]. Nicht-kausale Strategien bauen auf der genauen Kenntnis der zeitabhängigen Geschwindigkeit sowie der Positions- und Höhendaten von Fahrzyklen auf. Optimierungsverfahren werden dabei unabhängig vom fahrenden Fahrzeug eingesetzt und ermöglichen die Ableitung einer optimalen Betriebsweise. Solche Ansätze werden daher als optimal, oder auch als *Offline*-Betriebsstrategien bezeichnet, können jedoch im realen Pkw-Betrieb aufgrund unvorhersehbarer Verkehrssituationen und Verhaltensweisen des Fahrers kaum eingesetzt werden [113, S. 205ff.].

Kausale Betriebsstrategien verwenden ausschließlich momentan verfügbare Informationen über den Fahrzustand des Pkw und die Betriebszustände der Fahrzeugkomponenten. Da in diesem Falle die Betriebszustände der Komponenten während eines Fahrzyklus nicht genau bekannt sind, kann das Optimum nicht erreicht werden. Solche Verfahren werden daher als

suboptimale oder auch als *Online*-Betriebsstrategien bezeichnet [56, S. 211, 113, S. 205ff.]. Eine verbesserte Lösung kann durch die Erweiterung der Betriebsstrategie um adaptive oder prädiktive Anteile, beispielsweise auf der Basis von Navigationsdaten der vorausberechneten Fahrstrecke oder von aktuellen Verkehrsinformationen, erreicht werden.

Bild 4-2: Klassifizierung von Betriebsstrategien für Hybrid-Pkw.

Eigene Darstellung nach [56, 113].



Weiterhin wird je nach Art und Umfang der zur Realisierung von Betriebsstrategien ausgewerteten Informationen sowie abhängig von der Methode der Auswertung zwischen analytischen und erfahrungsbasierten beziehungsweise heuristischen Betriebsstrategien unterschieden [114, S. 35]. Bei analytischen Verfahren können Berechnungsergebnisse durch Rückrechnung stets auf die Eingangsgrößen zurückgeführt werden. Im Gegensatz dazu ist die Interpretation von Ergebnisverläufen bei heuristischen Verfahren aufgrund der unscharfen Abbildung der Ergebnisse auf die Eingangswerte kaum noch möglich.

Insgesamt sind in der Literatur dokumentierte Betriebsstrategieentwürfe häufig an ein bestimmtes Fahrzeug, meist einen Versuchsträger, oder an eine bestimmte Antriebs-topologie gebunden. Eine Auswahl relevanter Arbeiten ist in **Tab. 4-2** zusammengestellt. Die komplexen Bewertungsfunktionen werden je nach Aufgabenstellung in unterschiedlichen Kombinationen von Lösungsverfahren eingesetzt. Hauptzielrichtung der dargestellten Betriebsstrategieentwicklungen ist die Verbrauchsreduzierung, teilweise ergänzt durch Kriterien, die die Abgasemissionen [115] oder die Fahrbarkeit [116] betreffen. Dessen ungeachtet kann die konkrete Gestaltung von Bewertungsfunktionen auch die Minimierung der Verlustleistung [115, 116, 117] oder spezieller Kostenfunktionen [114] betreffen. In Altenthan (2009) [116] wird eine analytische *Online*-Bewertungsfunktion zur Ableitung einer heuristischen Betriebsstrategie für ein als *Two-mode* Hybrid ausgeführtes SUV¹-Konzept verwendet.

¹ Sport Utility Vehicle, SUV.

Tab. 4-2: Beispiele für Betriebsstrategieentwicklungen.

Wenn nicht anders angegeben, wurden *online*-Strategien entwickelt.

ASG: automatisiertes Schaltgetriebe; **CVT:** *Continuously variable transmission*; **FLC:** *Fuzzy logic controller*;

PAH: Parallelhybrid; **SEH:** Serieller Hybrid; **SUV:** *Sport utility vehicle*.

Quelle	Hybrid-Typ	Betriebsstrategie	Bewertungsfunktion	Gegenstand der Analyse
Altenthan (2010) [116]	<i>Two-mode Full-Hybrid</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ analytisch ▪ heuristisch 	Verlustminimierung	BMW <i>Two-mode</i> hybrid SUV mit Ottomotor
Back (2006) [118]	PAH <i>Mild-Hybrid</i>	prädiktiv	Verbrauchsminimierung (Bolza'sches Gütemaß)	Mercedes-Benz S-Klasse mit Ottomotor
Böckl (2008) [29]	PAH <i>Mild-Hybrid</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ adaptiv ▪ prädiktiv 	Heuristische Regeln zur Steuerung der Hybridfunktionen	VW Bora <i>Mild-Hybrid</i>
Jörg (2009) [117]	PAH CVT-Hybrid	Prädiktiv, heuristisch (neuronale Netze)	Minimierung der Verlustleistung	TU München; CVT-Hybrid (Opel Vectra Caravan)
Kleimaier (2003) [115]	PAH CVT-Hybrid	<ul style="list-style-type: none"> ▪ offline ▪ online 	Minimierung der Verlustleistung	TU München; autarker Hybrid (Opel Astra Caravan)
Körner (2002) [50]	SEH <i>Full-Hybrid</i>	<ul style="list-style-type: none"> ▪ offline ▪ online, FLC 	Verbrauchsminimierung (Lagrange'sches Gütemaß)	Simulation und Teststand für Motor-Generatoreinheit
Stiegeler (2008) [114]	PAH ASG	<ul style="list-style-type: none"> ▪ prädiktiv ▪ analytisch 	Verbrauchsminimierung (analytische Kostenfunktion)	theoretisch & Antriebsstrang-teststand

Böckl (2008) [29] entwickelt adaptive und prädiktive Energiemanagementstrategien. Grundlage der adaptiven Strategie sind die Beträge an elektrischer Energie, die aus spezifischen elektrischen Leistungsverläufen für einen zurückliegenden Bilanzzeitraum ermittelt worden sind. Deren vergangenheitsbasierte Aufteilung wird als maßgeblich für die Vorausschau angenommen und resultiert in einem Sollwert für die Lastpunktanhebung oder -absenkung. Zur Steuerung des Batterieladezustands werden Hybridfunktionen gewichtet, wobei der Ladezustand in einem als optimal definierten Bereich gehalten wird. Nur im prädiktiven Energiemanagement findet eine dynamische Anpassung des SOC-Sollwerts vor Gefällestrecken statt.

Kleimaier (2003) [115] und Jörg (2009) [117] nutzen die Summe der Verlustleistungen von Systemkomponenten als zu minimierende Bewertungsfunktion. Beide Arbeiten beziehen sich auf einen Parallelhybrid mit CVT-Getriebe. In [115] wird zur Steuerung der LPA ein Gewichtungsfaktor α definiert, der auf die Bewertungsfunktion wirkt und auf diese Weise die Ladezustandssteuerung der Batterie ermöglicht.

Weitere, hier nicht dargestellte Beispiele für die Entwicklung heuristischer, *Fuzzy logic controller* (FLC-) gestützter Betriebsstrategien sind in Li et al. (2008) [69] und Schouten et al. (2002) [24] für PAH zu finden. Kisacikoglu et al. (2009) [119] sowie Eren et al. (2009) [120] nutzen FLC-Verfahren für FCV, die mit Superkondensatoren hybridisiert sind.

Für den Ansatz in dieser Arbeit ist maßgeblich, dass Optimierungsverfahren in einheitlicher Form für die untersuchten Konzepte anwendbar und auch bei veränderter Dimensionierung

der Systemkomponenten ohne großen Anpassungsaufwand funktionsfähig sind. Heuristische Verfahren werden für den Zweck der Modellentwicklung in dieser Arbeit als nicht geeignet angesehen, da den Steuerungen zugrundeliegende Regelsätze bei veränderten Antriebsparametern üblicherweise aufwendig neu bestimmt werden müssen. Aus diesem Grunde werden einheitlich analytische Verfahren zur Steuerung der Antriebssystemkomponenten eingesetzt. Die Steuerung des Batterieladezustands wird mithilfe einfacher heuristischer Regeln umgesetzt.

Für die Umsetzung der optimierenden Laststeuerung wird es für den in dieser Arbeit gewählten Ansatz als einfacher angesehen, eine zu maximierende Größe zu nutzen, da ungünstige Elemente der später erläuterten Optionsvektoren den Wert null führen. Eine zu minimierende Größe ist aus diesem Grund nicht sinnvoll. Die gewählte Bewertungsfunktion betrifft hier den zu maximierenden Kraftstoffnutzungsgrad. Die verwendete Gleichung in allgemeiner Form ist in Unterabschnitt 4.1.3 und die konzeptspezifischen Funktionen sind in den Unterabschnitten 5.7.5 und 5.7.7 zu finden.

Stellgrößen der hier entwickelten Betriebsstrategien sind die Drehmomente der Antriebsmaschinen und die Wahl von Gangstufe und Betriebsmodus. Es werden ausschließlich momentan verfügbare Parameter in die Optimierung einbezogen. Mit Verweis auf die Klassifizierung von Betriebsstrategien in **Bild 4-2** entspricht dieser Ansatz zunächst einem instant-analytischen Optimierungsverfahren. Ergänzend kommen einfache heuristische Regeln zur Steuerung des Batterie-SOC zur Anwendung. Priorität bei der Bestimmung von Sollwerten der Antriebsmaschinen hat die Erfüllung der Fahrleistungsanforderung. Wie zuvor bereits erläutert wurde, steht im Mittelpunkt der hier angewandten Betriebsstrategien die Optimierung des Kraftstoffverbrauchs durch Maximierung des Kraftstoffnutzungsgrads.

4.1.3 Spezifizierung der Bewertungsfunktion

In diesem Unterabschnitt wird die allgemeine Form der verwendeten Bewertungsfunktion festgelegt. Die konzeptspezifischen Funktionen werden im Zusammenhang mit deren Umsetzung in den Simulationsmodellen als Teil der verbrauchsoptimierenden Laststeuerung in den Unterabschnitten 5.7.5 und 5.7.7 erläutert.

Als Basis der optimierenden Laststeuerung wird der Kraftstoffnutzungsgrad als Verhältnis der Nutzleistungen zum eingesetzten Kraftstoff definiert:

$$\eta_{KS} = \frac{P_{GTE}^m + P_{NP,i}^e + P_{KB,j}^{th}}{P_{VM}^{ch}} \quad (4-2)$$

P_{GTE}^m	mechanische Leistung am Getriebeeingang
$P_{NP,i}^e$	unmittelbar oder zeitverzögert in Antrieb und Bordnetz genutzte elektrische Leistung
$P_{KB,j}^{th}$	unmittelbar zur Kabinenheizung einsetzbare thermische Leistung aus Abwärme
P_{VM}^{ch}	chemische Leistung des verbrauchten Kraftstoffs

Je nach Antriebskonzept kann elektrische Leistung unmittelbar im Bordnetz (alle Konzepte) oder zeitversetzt in Bordnetz oder Antrieb (PAH und FCV) genutzt werden. Elektrische Leistung wird in dieser Arbeit als nutzbare Leistung definiert, soweit sie nicht an den Betrieb eines Aggregats, zum Beispiel einer Antriebsmaschine oder der Brennstoffzelle gekoppelt ist. Bei positiver Batterieleistung muss diese noch mithilfe des Wirkungsgrads der Strombereitstellung, bezogen auf den eingesetzten Kraftstoff, bewertet werden. Bei negativer Batterieleistung wird der Wirkungsgrad der zeitversetzten Nutzung zur Bewertung herangezogen. Eine wichtige Rolle innerhalb der Bewertungsfunktion kommt daher den Wirkungsgradketten der Stromnutzung zu. Dies soll kurz anhand des differentiellen Wirkungsgrads als Teil der Wirkungsgradkette der Strombereitstellung und -nutzung erläutert werden. In der in den Unterabschnitten 5.7.5 und 5.7.7 folgenden Vorstellung der energetischen Bewertungsfunktion als Teil der Betriebsstrategie spielt diese Wirkungsgraddefinition hingegen keine Rolle mehr, da die Gesamtenergiebilanz den differentiellen Wirkungsgrad bereits berücksichtigt. Aufbauend auf den folgenden Ausführungen werden in den Abschnitten 4.2 bis 4.5 die konzeptspezifischen Wirkungsgradketten definiert.

Die Definition des differentiellen Wirkungsgrads laut Gleichung 2-1 (S. 7) wird erweitert, indem die mechanische Zusatzleistung mit dem Wirkungsgrad des Nutzungspaths η_{NP} dieser Leistung bewertet wird. Der erweiterte differentielle Wirkungsgrad wird wie folgt definiert:

$$\eta_{diff,VM}^* = \eta_{diff,VM} \cdot \eta_{NP} = \frac{\Delta P_{VM}^m}{\Delta P_{VM}^{ch}} \cdot \eta_{NP} \quad (4-3)$$

Für FCV gilt analog:

$$\eta_{diff,BZS}^* = \eta_{diff,BZS} \cdot \eta_{NP} = \frac{\Delta P_{BZS}^e}{\Delta P_{BZS}^{ch}} \cdot \eta_{NP} \quad (4-4)$$

In dieser Arbeit werden für η_{NP} Schätzwerte bestimmt. Dies ist notwendig, weil die Betriebszustände der Komponenten des Nutzungspaths – im Sinne der kausalen Betriebsstrategie – zum Zeitpunkt der Nutzung nicht vorhergesagt werden können. Entscheidend für die Ausführung der Lastpunktanhebung (LPA) ist, dass der erweiterte differentielle Wirkungsgrad den momentanen Wirkungsgrad des VM übersteigt. Es wird dabei grundsätzlich zwischen den Wirkungsgraden der Nutzung im Antrieb (η_{NPA}) und im Bordnetz (η_{NPB}) einerseits sowie zwischen der unmittelbaren ($\eta_{NPB,zg}$) und zeitverzögerten ($\eta_{NPA,zv}$ beziehungsweise $\eta_{NPB,zv}$) Nutzung andererseits unterschieden. Eine unmittelbare Nutzung zusätzlich erzeugter elektrischer Leistung im Antrieb ist in den hier untersuchten Konzepten nicht möglich.

In einer erweiterten Funktionalität der erstellten Modelle können adaptive Elemente in ähnlicher Weise wie in [29] genutzt werden, um eine präzisere Bestimmung von η_{NP} unter Nutzung vergangenheitsbezogener Werte zu ermöglichen. Dies wurde in dieser Arbeit noch nicht umgesetzt.

4.1.4 Verfahren der Ladezustandssteuerung

Eine weitere wichtige Fragestellung bei der Entwicklung der Betriebsstrategien betrifft die Ladezustandssteuerung des elektrischen Speichers bei Leistungsüberschuss oder -defizit. Bei PAH und FCV würde aufgrund der begrenzten Speicherkapazität der Batterie die uneingeschränkte Anwendung der verbrauchsoptimierenden Laststeuerung schnell zu Batterie-ladezuständen (SOC) außerhalb des zulässigen Betriebsbereichs führen. Je nach Fahrzyklus kann vermehrtes batterieelektrisches (BE-) Fahren ein zu starkes Absinken des Batterie-ladezustands oder häufige Lastpunktanhebung (LPA) in Verbindung mit rekuperativem Bremsen ein zu starkes Ansteigen des SOC bewirken. In der Konsequenz müssen Hybrid-funktionen beschränkt oder verstärkt werden. Die angestrebte Ladezustandsanpassung kann dementsprechend durch die Funktionen LPA und rekuperatives Bremsen (RKB) gezielt erhöht sowie durch BE-Fahren und Lastpunktreduktion gezielt abgesenkt werden. Da rekuperatives Bremsen nicht erzwungen werden kann, muss im Falle eines zu niedrigen Ladezustandes die Lastpunktanhebung aktiviert werden. Rekuperatives Bremsen wird bei hohem Batterie-ladezustand eingeschränkt.

Neben dem Ziel der Einhaltung von Ladezustandsgrenzen ist eine Steuerung sinnvoll, mit deren Hilfe je nach Fahrsituation einerseits genügend Leistung für die *Boost*-Funktion oder für BE-Fahren zur Verfügung gestellt werden kann. Andererseits ist eine genügend hohe Aufnahmefähigkeit für Bremsenergie wünschenswert. Aus diesem Grund kann ein – in Abhängigkeit von der Geschwindigkeit – variabler Sollwert des Ladezustands vorteilhaft sein. In analoger Weise ist dies in [29] im prädiktiv arbeitenden Energiemanagement umgesetzt worden, wobei die Topographie der vorausberechneten Strecke maßgeblich für die Festlegung des SOC-Sollwertes ist.

Allerdings sind Batterien für HEV heute so ausgelegt, dass nur ein kleiner Teil der Kapazität als zulässiger Betriebsbereich genutzt wird (siehe Unterabschnitt 3.8.1). Daher bewirkt der variable Sollwert im Wesentlichen eine verbesserte Einhaltung des Betriebsbereichs der Batterie. Sollten zukünftig Batteriesysteme mit größerer Zyklenzahl bei größerem Betriebsbereich des SOC verfügbar sein, steigt auch die Bedeutung des variablen SOC-Sollwerts. Deshalb wird in dieser Arbeit ein geschwindigkeitsabhängiger SOC-Sollwert berücksichtigt.

Unter anderem in [116] wird, ausgehend vom Momentanwert des SOC, eine Batteriesollleistung bestimmt und daraus ein Sollwert der VM-Drehmomentänderung errechnet. Im Sinne der LPA oder LPR wird der Batterie damit vermehrt elektrische Leistung zugeführt oder entnommen. Ein solcher Berechnungsschritt entfällt in den hier ausgeführten Betriebsstrategien. Ausgehend von den Elementen der in Unterabschnitt 5.7.1 erläuterten Optionsvektoren werden über den Weg der Ermittlung der Gesamtenergiebilanz die nutzungsgradoptimalen Maschinenmomente ermittelt. Die auf diese Weise ermittelten Sollwerte können jedoch abhängig vom Momentanwert des SOC so verschoben werden, dass sich LPA, LPR oder BE-Fahren günstiger darstellen und entsprechend favorisiert werden. Zusätzlich wird ein geschwindigkeitsabhängiges Element in die SOC-Steuerung eingebracht, das mit zunehmender Geschwindigkeit den angestrebten SOC-Bereich in

Richtung eines geringeren SOC verschiebt, um die Batterie beim zu erwartenden rekuperativen Bremsen im vorgegebenen Betriebsbereich zu halten.

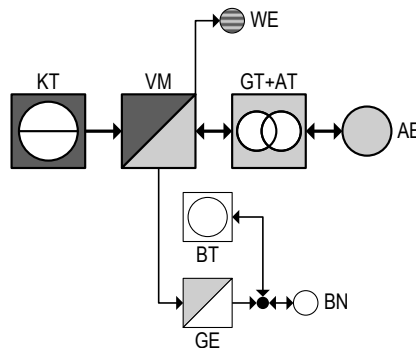
4.2 Verbrennungsmotor-Pkw – ICV

Zusammen mit dem Batterie-Pkw bildet das ICV mit Otto- oder Dieselmotor die bezüglich des Energiemanagements einfachste Variante der hier untersuchten Pkw-Konzepte. Von den Hybridfunktionen werden Stopp-Start und Lastpunktverschiebung am Verbrennungsmotor berücksichtigt. Eine Lastpunktverschiebung ist unter Einhaltung des VM-Betriebsbereiches durch die Wahl der Gangstufe möglich. Das Bordnetz (siehe Tab. 3-5) beinhaltet ausschließlich 14 V-Verbraucher. Im Unterschied zu PAH, BEV und FCV wird eine Kabinenkühlung nicht betrachtet und die Kabinenheizung durch Verbrennungsmotorabwärme und bei Bedarf mithilfe eines kraftstoffbetriebenen Heizelements angenommen. Die Topologie des Systems ist **Bild 4-3** zu entnehmen.

Bild 4-3: Vereinfachtes Schema des Verbrennungsmotorantriebs.

In der Simulation berücksichtigte Leitungsverluste sind hier nicht dargestellt.

AE: Antriebsenergie, AT: Achsantrieb, BN: 14 V-Bordnetz, BT: Batterie, EM: Elektromaschine, GE: Generator, GT: Getriebe, KT: Kraftstofftank, VM: Verbrennungsmotor, WE: Wärmeenergie.



4.3 Parallelhybrid mit Verbrennungsmotor – PAH

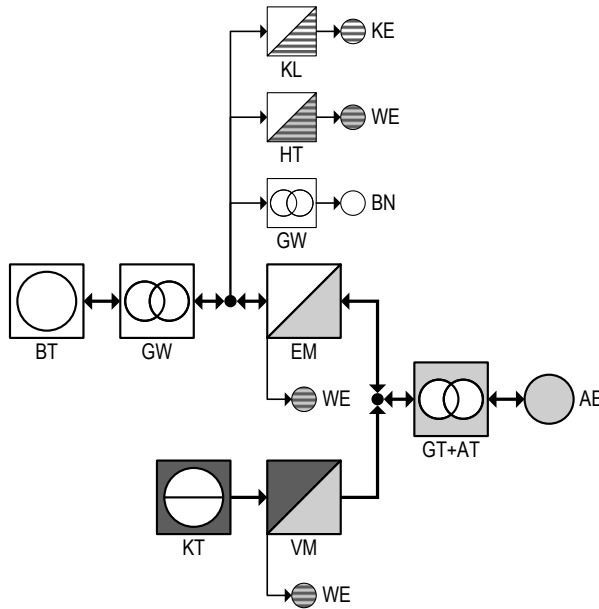
In parallelen Hybridantriebskonzepten (PAH) wirken Verbrennungsmotor und Elektromaschine jeweils ausschließlich oder kombiniert auf den Antrieb. Im kombinierten Betrieb überlagert die Elektromaschine durch Drehzahl-, Drehmoment- oder Zugkraftaddition den Verbrennungsmotorbetrieb. Drehzahladdition wird mithilfe von Planetengetrieben bei dann starrem Drehmomentverhältnis realisiert. Für die Drehmomentaddition können direkte Kopplung, Stirnradgetriebe oder Kettengeräte zur Anwendung kommen [56, S. 21]. Im Falle von Stirnrad- oder Kettengeräten ist das Drehzahlverhältnis der Antriebsmaschinen durch das Übersetzungsverhältnis festgelegt. Elektromaschinen können (i) auf der Kurbelwelle, (ii) am Getriebeeingang, (iii) am Getriebeausgang oder (iv) an separater Fahrzeugachse [112] platziert sein. Beispiele für Serienfahrzeuge deutscher

Automobilhersteller sind der VW Touareg hybrid, Audi A6 hybrid sowie Audi Q5 hybrid quattro. Diese Fahrzeuge sind als Einwellenhybride ausgeführt mit Hybridisierungsgraden (siehe Gleichung 4-1) von $\alpha_H = 12\%$ beim VW Touareg hybrid und $\alpha_H = 21\%$ bei den genannten Hybriden der Marke Audi. Diesen Angaben liegen Werte in [121, 122, 123] zugrunde.

Bild 4-4: Vereinfachtes Schema des Parallelhybridantriebs.

In der Simulation berücksichtigte Leitungsverluste sind hier nicht dargestellt.

AE: Antriebsenergie, **AT:** Achsantrieb, **BN:** 14 V-Bordnetz, **BT:** Batterie, **EM:** Elektromaschine, **GT:** Getriebe, **GW:** Gleichspannungswandler, **HT:** Heizelement, **KE:** Kühlenergie, **KL:** Klimagerät, **KT:** Kraftstofftank, **VM:** Verbrennungsmotor, **WE:** Wärmeenergie.



In dieser Arbeit wird der Parallelhybrid als Einwellenhybrid betrachtet, bei dem Verbrennungsmotor und Elektromotor auf die Getriebeeingangswelle wirken. Es sind die Funktionen Stopp-Start, *Boost*, BPV, RKB und BE-Fahren verfügbar. Aufgrund der Drehmomentaddition wirkt die Funktion LPA unmittelbar auf das VM-Drehmoment. Stellgrößen der Optimierung sind die Wahl der Gangstufe (BPV) und das EM-Drehmoment. Für BE-Fahren und beim rekuperativen Bremsen wird der Verbrennungsmotor über eine Trennkupplung vom Triebstrang entkoppelt. Ein solches Konzept wird beispielsweise in [124, S. 18] beschrieben. Der Zusatzaufwand einer zweiten Kupplung ist zu berücksichtigen. **Bild 4-4** zeigt diese Antriebstopologie ohne Darstellung der Trennkupplung.

Die Fahrzeugklimatisierung wird im Hochspannungsbordnetz betrieben, das darüber hinaus über einen Gleichspannungswandler das 14 V-Bordnetz versorgt. Für Heizzwecke wird VM- und EM- Abwärme genutzt. Vorteilhaft an diesem Konzept ist, dass im Vergleich der Konzepte ein großer Funktionsumfang (vgl. Tab. 4-1) mit einem vergleichsweise geringen

Modifikationsaufwand des Antriebs und unter Verwendung von nur einer Elektromaschine dargestellt werden kann. Es bestehen folgende Optionen der Nutzung der durch LPA oder RKB bereitgestellten Leistung:

- unmittelbare Nutzung im Bordnetz,
- zeitverzögerte Nutzung im Antrieb,
- zeitverzögerte Nutzung im Bordnetz.

Bei der unmittelbaren Nutzung der Zusatzleistung zur Versorgung elektrischer Verbraucher im Bordnetz ergibt sich folgender Wirkungsgrad:

$$\eta_{NPB,zg} = \eta_{EMG} \quad (4-5)$$

Die Wirkungsgrade sind wie folgt definiert:

$$\begin{array}{ll} \eta_{NPB,zg} & \text{W. der durch LPA bereitgestellten, mechanischen Antriebsleistung bei der unmittelbaren (zeitgleichen) Nutzung im Bordnetz} \\ \eta_{EMG} & \text{W. der Elektromaschine im Generatorbetrieb} \end{array}$$

Wird die Zusatzleistung zeitverzögert im Bordnetz genutzt, entstehen zusätzliche Verluste beim Laden und Entladen der Batterie (Gleichung 4-6). Die anzusetzenden Wirkungsgrade werden in dieser Arbeit geschätzt, da die Betriebszustände der beteiligten Systemkomponenten nicht im Vorhinein bekannt sind.

$$\eta_{NPB,zv} = \eta_{EMG} \cdot \eta_{GW} \cdot \eta_{Batt,ldn} \cdot \eta_{Batt,etl} \cdot \eta_{GW} \quad (4-6)$$

$$\begin{array}{ll} \eta_{NPB,zv} & \text{W. der durch LPA bereitgestellten, mechanischen Antriebsleistung bei der zeitverzögerten Nutzung im Bordnetz} \\ \eta_{GW} & \text{W. des Gleichspannungswandlers} \\ \eta_{Batt,ldn} & \text{W. beim Batterieladen} \\ \eta_{Batt,etl} & \text{W. beim Batterieentladen} \end{array}$$

Im Falle der Speicherung zur zeitverzögerten Nutzung im Antrieb müssen sowohl das Laden und Entladen der Batterie als auch der elektromechanische Antriebsstrang berücksichtigt werden (4-7). Analog zur Nutzung im Bordnetz werden auch hier die Wirkungsgrade geschätzt.

$$\eta_{NPA,zv} = \eta_{EMG} \cdot \eta_{GW} \cdot \eta_{Batt,ldn} \cdot \eta_{Batt,etl} \cdot \eta_{GW} \cdot \eta_{EMM} \quad (4-7)$$

$$\begin{array}{ll} \eta_{NPA,zv} & \text{W. der durch LPA bereitgestellten, mechanischen Antriebsleistung bei der zeitverzögerten Nutzung im Antrieb} \\ \eta_{EMM} & \text{W. der Elektromaschine im Generatorbetrieb} \end{array}$$

Beim Entladen der Batterie wird für die in der Batterie gespeicherte Energie ein mittlerer kraftstoffbezogener Wirkungsgrad $\bar{\eta}_{KSB}$ geschätzt.

Zur Skalierung der Antriebsaggregate werden, über die Angaben in Tab. 3-3, S. 21 hinaus, folgende Parameter definiert:

- Dauerantriebsleistung, z.B. für Autobahn- oder lange Steigungsfahrten,
- Leistung der Elektromaschine zur Realisierung von LPA, *Boost*-Funktion und RKB,
- Batteriekapazität und -leistung zur Realisierung derselben Funktionen.

Aufgrund der hohen Speicherdichte des Kraftstoffs wird die Skalierung des Kraftstoffspeichers vernachlässigt. Es werden iterative Skalierungsroutinen zur Bestimmung der Leistungsklasse der Antriebskomponenten verwendet. Die Skalierung des VM wird durch die zu erreichende Höchstgeschwindigkeit bestimmt. Bei der Elektromaschine wird in dieser Arbeit nur von der Dauerantriebsleistung ausgegangen. Eine zeitlich begrenzte Überlastfähigkeit wird nicht betrachtet, so dass Zeitkonstanten zur Abkühlung der EM zwischen *Boost*-Vorgängen nicht berücksichtigt werden müssen.

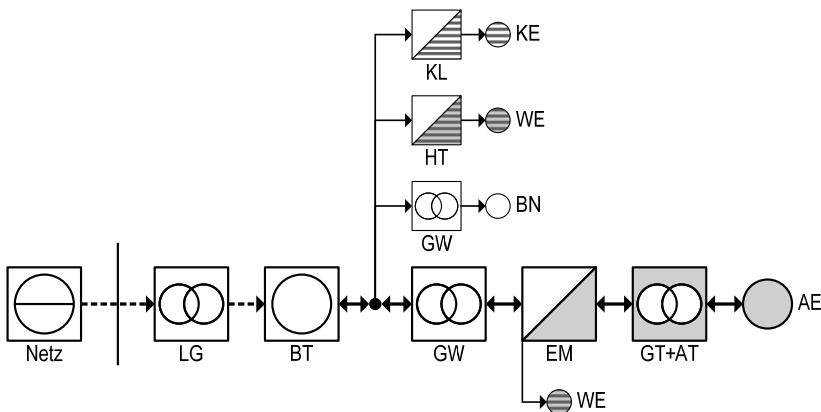
4.4 Batterie-Pkw – BEV

Die Hybridfunktionen Lastpunkthanhebung und Lastpunktreduktion sind bei BEV nicht verfügbar, da keine anderen Energiewandler als Batterie und Elektromotor zum Einsatz kommen. Betriebspunktverschiebung ist an der Elektromaschine anwendbar, da im hier definierten Konzept ein Zweistufengetriebe verwendet wird. BE-Fahren ist der einzig mögliche Betriebsmodus.

Bild 4-5: Vereinfachtes Schema des Batterieantriebs.

In der Simulation berücksichtigte Leitungsverluste sind hier nicht dargestellt.

AE: Antriebsenergie, **AT:** Achsantrieb, **BN:** 14 V-Bordnetz, **BT:** Batterie, **EM:** Elektromaschine, **GT:** Getriebe, **GW:** Gleichspannungswandler, **HT:** Heizelement, **LG:** Ladegerät, **KE:** Kühlenergie, **KL:** Klimagerät, **WE:** Wärmeenergie.



Die Bordnetzstruktur entspricht der von PAH. Im Unterschied zu diesen muss jedoch die Fahrzeugklimatisierung fast ausschließlich mithilfe elektrischer Leistung aus der Batterie versorgt werden. Die in dieser Arbeit verwendete Topologie des Antriebs ist in **Bild 4-5** schematisch dargestellt. Für die Skalierung der Antriebskomponenten wird, ergänzend zu den

Angaben in Tab. 3-3, die Reichweite von BEV in dieser Arbeit mit 150 km im MVEG Fahrzyklus festgelegt.

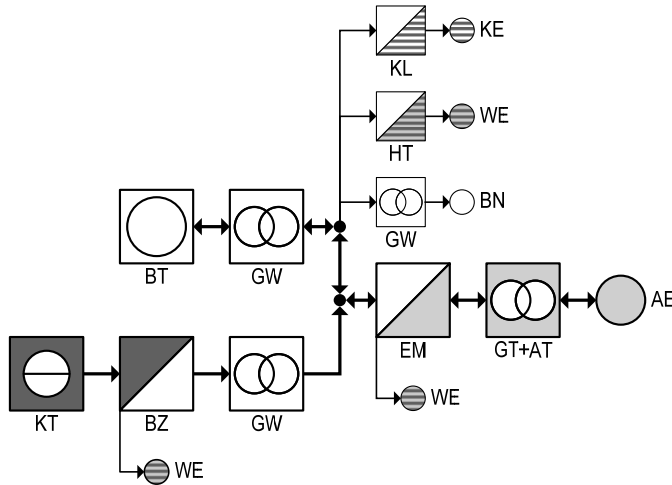
4.5 Brennstoffzellen-Pkw – FCV

Die Antriebstopologie des in dieser Arbeit untersuchten FCV kann **Bild 4-6** entnommen werden. Der Betrieb des Brennstoffzellensystems kann mithilfe von LPA und LPR optimiert werden.

Bild 4-6: Vereinfachtes Schema des Brennstoffzellenantriebs.

In der Simulation berücksichtigte Leistungsverluste sind hier nicht dargestellt.

AE: Antriebsenergie, **AT:** Achsantrieb, **BN:** 14 V-Bordnetz, **BT:** Batterie, **BZ:** Brennstoffzellensystem, **EM:** Elektromaschine, **GT:** Getriebe, **GW:** Gleichspannungswandler, **HT:** Heizelement, **KE:** Kühlenergie, **KL:** Klimagerät, **KT:** Kraftstofftank, **WE:** Wärmeenergie.



Im Unterschied zu Hybriden mit Verbrennungsmotor wird mithilfe der LPA zusätzliche elektrische Leistung bereitgestellt. Damit verkürzen sich die für die Bewertung relevanten Wirkungsgradketten der Nutzungspfade im Vergleich zu PAH. Bei der unmittelbaren Nutzung im Bordnetz müssen keine weiteren Verluste berücksichtigt werden. Wird die Energie zeitverzögert im Bordnetz genutzt, entstehen zusätzliche Verluste beim Laden und Entladen des elektrischen Speichers:

$$\eta_{NPB,zv} = \eta_{GW} \cdot \eta_{Batt,ldn} \cdot \eta_{Batt,etl} \cdot \eta_{GW} \quad (4-8)$$

Im Falle der Speicherung zur zeitverzögerten Nutzung im Antrieb müssen sowohl das Laden und Entladen der Batterie als auch der elektromechanische Antriebsstrang berücksichtigt werden:

$$\eta_{NPA,zv} = \eta_{GW} \cdot \eta_{Batt,ldn} \cdot \eta_{Batt,etl} \cdot \eta_{GW} \cdot \eta_{EMM} \quad (4-9)$$

Ergänzend zu den Angaben in Tab. 3-3, S. 21, werden zur Skalierung der Antriebskomponenten folgende Parameter definiert:

- Dauerleistung des Brennstoffzellensystems, z.B. für Autobahn- oder Steigungsfahrten,
- Reichweite von 400 km im MVEG-Fahrzyklus.

4.6 Fazit

In Kapitel 4 wurden die zu untersuchenden Pkw-Konzepte bezüglich ihrer topologiespezifischen Möglichkeiten der Verbrauchsoptimierung detailliert erläutert. Die Auswahl der zugehörigen Funktionen orientierte sich dabei an Merkmalen heutiger Hybridantriebe. Darüber hinaus wurden die in dieser Arbeit einzusetzenden Betriebsstrategien spezifiziert und es wurde festgelegt, dass die im Rahmen der Verbrauchsoptimierung benötigten Parameter ausschließlich momentan verfügbare Daten des Antriebs nutzen. Erweiterungen der Betriebsstrategien um adaptive Elemente sind möglich, werden in dieser Arbeit jedoch nicht einbezogen.

Für die im nachfolgenden Kapitel im Abschnitt 5.7 erläuterte verbrauchsoptimierende Laststeuerung wurden in Unterabschnitt 4.1.2 der Kraftstoffnutzungsgrad als zu maximierende Größe bei der Auswahl erforderlicher Steuerungsparameter des Antriebs definiert. Wesentliches Element der Bewertung optionaler Betriebspunkte bezüglich des Kraftstoffnutzungsgrads ist die Definition von Wirkungsgradketten

- der Nutzung zusätzlich erzeugter Leistung aus der Lastpunkthanhebung zur zeitgleichen oder – nach Zwischenspeicherung in der Batterie – zeitverzögerten Nutzung,
- der beim Entladen der Batterie im Hochspannungsnetz verfügbaren elektrischen Leistung.

Solche Wirkungsgradketten wurden für Parallelhybride (PAH) und Elektro-Pkw mit Brennstoffzellen (BEV) festgelegt und bilden die Basis der Bestimmung des Kraftstoffnutzungsgrads, der die Bewertungsfunktion darstellt. Für Verbrennungsmotor-Pkw und Elektro-Pkw mit Batterie sind deutlich einfachere Optimierungsfunktionen einsetzbar, die sich auf die Wahl der verbrauchsgünstigsten Gangstufe beziehen. Abweichungen der in dieser Arbeit ermittelten Kraftstoffverbrauchswerte vom Verbrauchsoptimum, dessen Bestimmung für einen gegebenen Fahrzyklus den Einsatz nicht-kausaler Betriebsstrategien (siehe Abschnitt 4.1) erfordert, sind im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht quantifizierbar, da solche Verfahren hier nicht zur Verfügung stehen.

Die Ladezustandssteuerung der Batterie erfolgt bei PAH und FCV durch einen Eingriff in die oben genannte Bewertungsfunktion. Durch die damit einhergehende Abweichung vom Verbrauchsoptimum wird der tatsächliche Kraftstoffnutzungsgrad verringert.

5 Dynamische Systemsimulation

In diesem Kapitel wird die Vorgehensweise bei der Kraftstoffverbrauchsanalyse mithilfe von Erläuterungen zum Berechnungsablauf und zur Struktur der in dieser Arbeit erstellten Simulationsmodelle vorgestellt (Abschnitte 5.1 bis 5.4). Diese bilden zusammen mit den Ausführungen zur Modellierung der Systemkomponenten (Abschnitt 5.5) und deren thermischer Integration (Abschnitt 5.6) die Basis zum Verständnis der Entwicklung der optimierenden Betriebsstrategie (Abschnitt 5.7).

Die in der Software-Umgebung Matlab/Simulink® entwickelten Simulationsmodelle stellen Kombinationen aus theoretischen Modellkomponenten und experimentell ermittelten Betriebskennfeldern dar und werden daher auch als hybride Simulationsmodelle bezeichnet [125, S. 29f]. Modellkomponenten, die eine hohe Komplexität aufweisen und dadurch zu deutlich verlängerten Simulationszeiten führen, werden in dieser Arbeit vereinfachend als Kennlinienmodelle abgebildet. Dazu gehören insbesondere Verbrennungs- und Elektromotoren sowie Brennstoffzellen.

Tab. 5-1: Vorzeichenkonvention für in dieser Arbeit erstellte Simulationsmodelle.

Wandler/ Übertrager	Betriebsweise	Vorzeichen der Werte
Antrieb (Getriebe, Rad)	Positive Zugkraft	positiv
	Negative Zugkraft (Bremsen)	negativ
Verbrennungsmotor	Kraftstoff	positiv
	Motorbetrieb, Leistung für Antrieb	positiv
	Motorbetrieb, Leistung für Generator	negativ
	Schubbetrieb	negativ
Elektromaschine	Motorbetrieb	positiv
	Generatorbetrieb	negativ
Batterie	Batterie laden	negativ
	Batterie entladen	positiv
	Kraftstoff	positiv
Brennstoffzellensystem	Elektrische Leistung, Antrieb	positiv
	Elektrische Leistung, Batterie	negativ

Für modellübergreifend konsistente Berechnungen wird eine einheitliche Vorzeichenkonvention getroffen, die **Tab. 5-1** zu entnehmen ist. Bezogen auf die Wandler Verbrennungsmotor, Elektromotor und Brennstoffzellensystem tragen chemische, elektrische und mechanische Leistungen in Richtung ihrer Nutzung im Antrieb ein positives Vorzeichen. Aus den Bilanzen an den Knotenpunkten Getriebeeingang beziehungsweise Bordnetz resultieren die Vorzei-

chen der weiteren mechanischen und elektrischen Leistungen. Damit ist die Kraftstoffzufuhr zum Verbrennungsmotor beziehungsweise Brennstoffzellensystem stets positiv, sowie auch die vom Verbrennungsmotor abgegebene mechanische und die vom Brennstoffzellensystem abgegebene elektrische Leistung. Analog gelten für die Elektromaschine positive elektrische und mechanische Leistungen im Motorbetrieb. Bei negativer Antriebsleistung wird wegen des negativen Schleppmoments die mechanische VM-Leistung negativ. Im Falle der Lastpunktanhebung bei PAH führt die Bilanz am Getriebeeingang zu negativen mechanischen und elektrischen Leistungen der als Generator betriebenen Elektromaschine. Batterieladeleistungen sind aufgrund der zuvor genannten Definitionen stets negativ und Batterieentladeleistungen positiv.

Im Folgenden werden, nach einer zusammenfassenden Beschreibung von Simulationaufgaben, Berechnungsablauf und dem Vorgehen bei der Bestimmung der Leistungsklassen der Komponenten, die Teilmodelle detailliert erläutert.

5.1 Allgemeine Simulationaufgaben und Berechnungsablauf

Die in dieser Arbeit definierten Simulationaufgaben lassen sich grundsätzlich in Vollast- und Fahrzyklussimulationen unterteilen. Dabei erfordert die Bearbeitung einer Simulationaufgabe eine Abfolge von Einzelschritten aus

- Variablendeklaration,
- Berechnungen zur Bestimmung von Simulationsparametern,
- Simulationsdurchlauf und
- Bereitstellung von Ergebnissen für die Auswertung.

Vollastsimulationen dienen der Überprüfung der Einhaltung von Fahrleistungsanforderungen. Sie werden daher vor allem im Rahmen der Skalierungsroutinen zur Bestimmung der Leistungsklassen der Antriebskomponenten eingesetzt. Fahrzyklussimulationen sind das Kernelement der Kraftstoffverbrauchsbestimmung. Weitere notwendige Erläuterungen enthält Abschnitt 5.3 hinsichtlich der Fahrzyklussimulationen und Abschnitt 5.4 zur Nutzung der Simulationaufgaben bei der Bestimmung der Leistungsklasse von Antriebskomponenten.

Wie bereits dargestellt wurde, sind im Rahmen dieser Arbeit Simulationsmodelle durchgängig als Simulink®-Blockschaltbilder entwickelt worden. Die mit deren Hilfe durchgeführten dynamischen Berechnungen sind in speziell für die jeweilige Simulationaufgabe erstellte, *skript*-basierte Routinen¹ eingebettet. Diese steuern alle für die Bearbeitung der Simulationaufgaben notwendigen Schritte (siehe weiter oben in diesem Abschnitt). Demgemäß erfolgt

¹ Der Begriff Routine kennzeichnet in dieser Arbeit eine, hier als Matlab-Programmcode vorliegende, Abfolge von Operationen zur Steuerung von Variablendeklarationen, Berechnungen und Simulationsdurchläufen, die manuell und automatisiert ausgelöst werden kann.

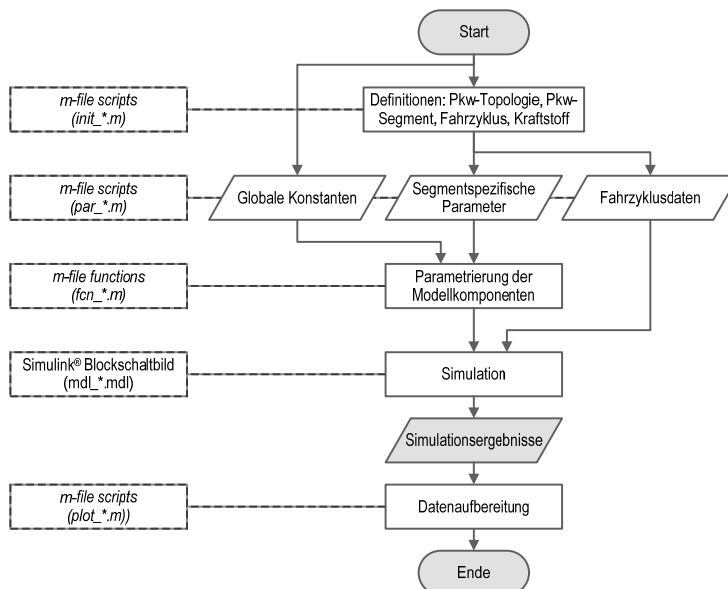
die Parametrierung der Modelle in zwei Schritten. Zunächst werden mithilfe von *m-file scripts*¹ zur ausschließlichen Variablendeklaration:

- global² gültige Konstanten und Nominalwerte der Skalierungsgrößen initialisiert,
- segmentspezifische Parameter, wie zum Beispiel Querspanntfläche und Widerstandsbeiwerte festgelegt und
- Kennwerte von Modellkomponenten definiert.

Im zweiten Schritt werden unter Nutzung von *m-file functions* auf Basis der zuvor definierten Parameter alle vor Beginn der Simulation notwendigen Berechnungen ausgeführt. Dazu gehören die Anpassung von Getriebeübersetzungen sowie von Kennlinien und Kennfeldern der Maschinen an die zuvor definierten Nominalwerte der Maschinenmomente und schließlich die Bestimmung der Massen von Antriebskomponenten. Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit werden Parameter gleicher Zugehörigkeit in Form von Variablen des Matlab-Datentyps *structure* strukturiert angelegt. Gleiche Zugehörigkeiten bestehen zum Beispiel für Parameter des Gesamtfahrzeugmodells, einzelner Modellkomponenten oder für global gültige physikalische Konstanten und Stoffdaten.

Bild 5-1: Vereinfachter Programmablaufplan zur Beschreibung des Ablaufs der Simulationsrechnungen.

Blöcke mit gestrichelter Umrandung verweisen auf eingesetzte Dateitypen und die Systematik bei deren Bezeichnung.



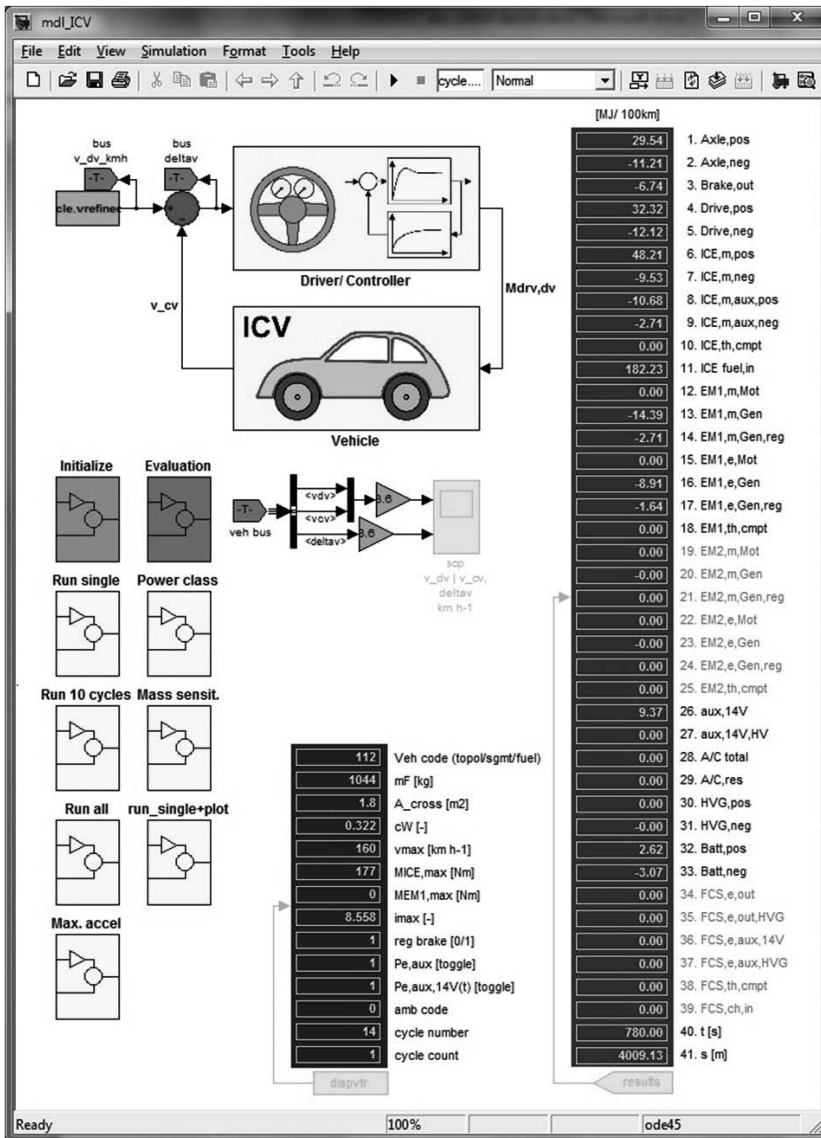
¹ Für die hier notwendigen Erläuterungen werden Begriffe aus der Terminologie von Matlab/Simulink® verwendet. *m-files* sind prinzipiell Textdateien, die ausführbaren Matlab-Code enthalten und die manuell ausgeführt oder automatisiert von übergeordnetem Programmcode aufgerufen werden können.

² Global gültige Konstanten gelten für alle Simulationsmodelle.

Das zuvor beschriebene Zusammenspiel aus *skript*-basierten Funktionen und Simulationsdurchläufen mithilfe der erstellten dynamischen Modelle verdeutlicht **Bild 5-1**. Der dort gezeigte Ablauf stellt die einfachste Programmroutine dar, die zur Verbrauchsbestimmung genutzt wird. Erweiterte Programmroutinen wiederholen diesen Programmablauf unter Variation aufgabenspezifischer Parameter, beispielsweise in einem iterativen Verfahren zur Skalierung der Antriebsmaschinen bei gegebenen Fahrleistungsanforderungen (siehe Abschnitt 5.4).

Bild 5-2: Hauptansicht der Simulationsmodelle.

Beispielhaft dargestellt für Pkw mit Verbrennungsmotor (ICV).



Die bereits genannten Blockschaltbilder enthalten die zur Darstellung der in den vorangegangenen Abschnitten beschriebenen Modellgleichungen notwendigen mathematischen Operationen. Aufgrund der Komplexität der Gesamtmodelle sind die Blockschaltbilder hierarchisch strukturiert. **Bild 5-2** zeigt beispielhaft die höchste Ebene des Simulationsmodells für Pkw mit Verbrennungsmotor (ICV). Darunter liegende Ebenen werden als *subsystems* bezeichnet. Die erstellten Blockschaltbilder setzen sich aus etwa 150 (BEV) bis 280 (PAH) *subsystems* zusammen, die insgesamt etwa 2000 (BEV) bis 4000 (PAH) Blöcke enthalten.

Anhand von **Bild 5-2** wird auch die Regelkreisstruktur der Simulationsmodelle deutlich, in der Fahrer und Antrieb einen Regelkreis bilden (oberer Bildbereich). Dabei reagiert der den Fahrer repräsentierende Regler auf Abweichungen der Ist- von der Sollgeschwindigkeit mit veränderter Gas- oder Bremspedalstellung. Der Ausgang des Reglers stellt zunächst das Sollmoment am Achsantrieb dar, das unter Nutzung verbrauchsoptimierender Betriebsstrategien in das Sollmoment am Getriebeeingang überführt wird. Dieses wird als Eingangsgröße an das dynamische Fahrzeugmodell übergeben. Fahrregler sowie die Steuer- und Regelfunktionen der Betriebsstrategie sind im *subsystem* „Driver/Controller“ untergebracht. Das dynamische Antriebsstrangmodell, bestehend aus Antriebsmaschine, Kraftübertragung und längsdynamischem Fahrzeugmodell, befindet sich im *subsystem* „Vehicle“. Zwischen beiden werden, wie aus der Abbildung ersichtlich ist, das Getriebeeingangsmoment ($M_{drv,dv}$, entsprechend $M_{GTE,soll}$) und die Fahrzeug-Istgeschwindigkeit (v_{cv} , entsprechend v_{ist}) übertragen¹. Eine erweiterte Darstellung der Modellstruktur enthält Abschnitt 5.7 im Zusammenhang mit der Entwicklung der verbrauchsoptimierenden Laststeuerung.

Die Auswertung der Simulationsrechnungen stützt sich auf Leistungsverläufe an den Schnittstellen der Systemkomponenten. **Tab. 5-2** fasst diese Leistungsverläufe zusammen. Anhang I enthält eine vollständige Liste der je Simulationsdurchlauf dokumentierten Ergebnisse. Über die angegebenen Signalverläufe hinaus werden zu Erläuterungszwecken je nach Bedarf auch weitere Simulationsergebnisse genutzt. Die als Zeitintegral der Leistung ermittelten Energiebeträge sind über deren Verfügbarkeit als Zahlenwerte im Matlab *Workspace* hinaus auch in der Hauptansicht der Simulationsmodelle ablesbar (**Bild 5-2**, rechter Bereich).

Zur Verbesserung der Übersichtlichkeit der Simulationsmodelle werden nur die wesentlichen Signale mithilfe von Signallinien übertragen. Insbesondere Signale, die über mehrere Modellebenen hinweg „transportiert“ werden müssen oder an mehreren Stellen im Modell erforderlich sind, werden in einem Datenbus erfasst und stehen somit modellweit zur Verfügung.

¹ Die Unterschiedlichkeit der Bezeichnung resultiert aus der gewählten, englischsprachigen Nomenklatur in den Modellen. cv: *current value*, drv: *drive*, dv: *desired value*,

Tab. 5-2: Dokumentierte Leistungsverläufe nach Energieform zur Auswertung der Ergebnisse.

Eine ausführliche Übersicht einschließlich verwendeter Formelzeichen und kurzer Erläuterungen ist in Anhang I zu finden.

Wandler/Übertrager	Mechanisch	Elektrisch	Thermisch	Chemisch
Achsantrieb	■	□	□	□
Getriebeeingang	■	□	□	□
Verbrennungsmotor	■	□	■	■
Elektromotor	■	■	■	□
Elektrischer Zwischenkreis	□	■	□	□
Batterie	□	■	■	□
Brennstoffzellensystem	□	■	■	■
Kabinenklimateisierung	□	■	■	■

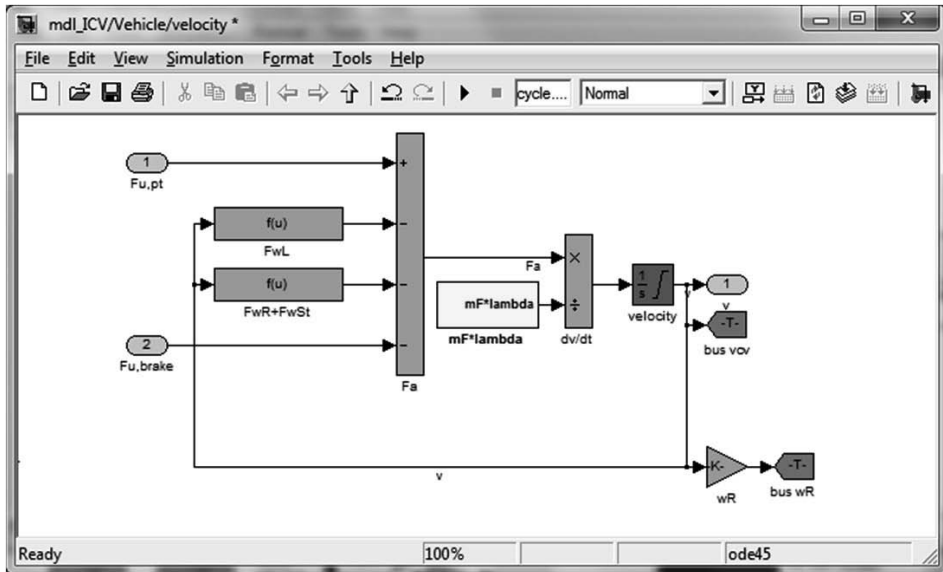
Legende: ■ dokumentierter Leistungsverlauf; □ nicht anwendbar

5.2 Charakterisierung des Modellansatzes

Alle hier entwickelten Simulationsmodelle sind, wie zuvor dargestellt, dynamische Modelle, in denen zeitabhängige Differentialgleichungen in die Integralform als Basis der numerischen Berechnung in Simulink® überführt wurden. Dieses Vorgehen bezieht sich speziell auf die dynamische Berechnung der Geschwindigkeit unter Vorgabe des Getriebeeingangsmoments und unter Berücksichtigung der Betriebsgrenzen der Maschinen sowie der Getriebeverluste. Nur aus diesem Teil des Modells, der sich im *subsystem* „Vehicle“ befindet und der nachfolgend als dynamisches Antriebsstrangmodell bezeichnet wird, werden Signalverläufe zur Ermittlung des Kraftstoffverbrauchs verwendet. Quasistatische Modelle kommen als Teil der Optimierungsverfahren zur Anwendung (siehe Bild 5-10, S. 89).

Exemplarisch für dynamische Modellteile zeigt **Bild 5-3** das Simulink®-Blockschaltbild des längsdynamischen Fahrzeugmodells entsprechend Abschnitt 3.2, Gleichung 3-6. Die Eingangsgrößen dieses Modellteils sind die Zugkraft des Antriebsstrangs (hier dargestellt als F_u, pt) und – im Verzögerungsfall – der Bremsen ($F_u, brake$). Innerhalb des *Subsystems* $mF * lambda$ wird der Drehmassenzuschlagfaktor λ (siehe Abschnitt 3.2) in Abhängigkeit der sich zeitabhängig ändernden Gangstufe berücksichtigt. Die Signalverknüpfung zur Getriebe-steuerung erfolgt aus dem Datenbus und ist daher nicht als Signallinie dargestellt.

Bild 5-3: Längsdynamisches Fahrzeugmodell gemäß Abschnitt 3.1.



5.3 Fahrzyklussimulationen

In Fahrzyklussimulationen werden Geschwindigkeitsprofile der im Abschnitt 3.4 definierten Fahrzyklen zur Vorgabe der Geschwindigkeitssollwerte verwendet. Darüber hinaus soll, gemäß der Aufgabenstellung dieser Arbeit, der Einfluss des Leistungsbedarfs der Nebenaggregate untersucht werden. Abhängig von den gewählten Umgebungsbedingungen werden dazu unterschiedliche Belastungsfälle des Bordnetzes aufgrund des dabei unterschiedlichen Leistungsbedarfs der Kabinenklimatechnik untersucht. Die zugehörigen Klimatisierungsfälle wurden im Abschnitt 3.6 definiert. Die in dieser Arbeit insgesamt verwendete Untersuchungsmatrix wird eingangs des Abschnitts 6.1 (Tab. 6-2) dargestellt.

Um den Einfluss unterschiedlicher Ladezustände der Batterie bei ICV, PAH und FCV zu minimieren, werden Fahrzyklen so oft durchfahren, bis die SOC-Differenz zwischen Simulationsanfang und -ende die hier festgelegte Schwelle von 0,1 % unterschreitet. Bei BEV erfolgt die Verbrauchsbestimmung in der Weise, dass der gewählte Fahrzyklus mit anfangs vollgeladener Batterie so lange durchfahren wird, bis die Entladeschlussspannung U_{EOD} (End of discharge, EOD) erreicht ist. Die dann der Batterie wieder zuzuführende nominelle Energiemenge wird zur Verbrauchsermittlung herangezogen. Dieses Vorgehen soll sicherstellen, dass sich die ladezustandsabhängige Bremsenergierückgewinnung nicht verfälschend auf das Ergebnis auswirkt.

Der Einfluss des Kaltstarts kann in dieser Arbeit nicht untersucht werden, weil Kennfeldabhängigkeiten der Maschinen und Brennstoffzellensysteme von der Temperatur hier nicht

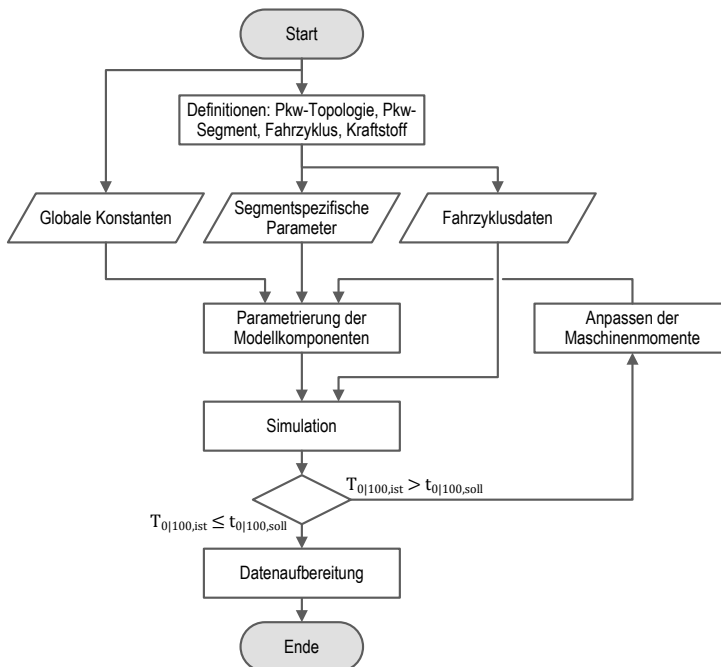
vorliegen. Als Startbedingungen wird in den hier durchgeführten Simulationen angenommen, dass die Betriebstemperaturen der Systemkomponenten bereits erreicht sind.

5.4 Bestimmung der Leistungsklassen von Antriebskomponenten

Mithilfe eines iterativen Verfahrens werden Nominalwerte von Antriebskomponenten, zum Beispiel Maschinenmomente und Batteriekapazitäten, unter Nutzung von dafür erstellten Skalierungsroutinen ermittelt. Ziel ist es, die Leistungsfähigkeit der Antriebskomponenten an die vorgegebene Beschleunigungszeit $t_{0|100}$ und Höchstgeschwindigkeit v_{max} (siehe Tab. 3-3, S. 21) anzupassen. Dazu wird die Kennlinie des maximalen Drehmoments der Antriebsmaschinen in diskreten Schritten in Richtung höherer Drehmomente verschoben bis die geforderte Beschleunigungszeit laut Tab. 3-3 eingehalten wird. Zur Verringerung der Durchlaufzeit der Skalierungsroutine wird die Schrittweite mit 50 Nm zunächst hoch angesetzt und nachfolgend schrittweise reduziert. Die Feinabstimmung erfolgt im letzten Anpassungsschritt bei einer Schrittweite von 1 Nm.

Bild 5-4: Vereinfachter Programmablaufplan von Skalierungsroutinen.

Für alle Konzepte erfolgt in analoger Weise zusätzlich eine Anpassung der Antriebsleistung hinsichtlich des Erreichens der geforderten Höchstgeschwindigkeit, bei BEV wird darüber hinaus auch die Reichweite getestet und gegebenenfalls die Batteriekapazität erhöht. Diese Funktionen sind zur Vereinfachung der Abbildung hier nicht dargestellt.



Als Ergebnis der Anwendung dieses Verfahrens zur Leistungsklassifizierung lässt sich festhalten, dass die Beschleunigungszeiten bis auf $\pm 0,04$ s genau eingehalten werden.

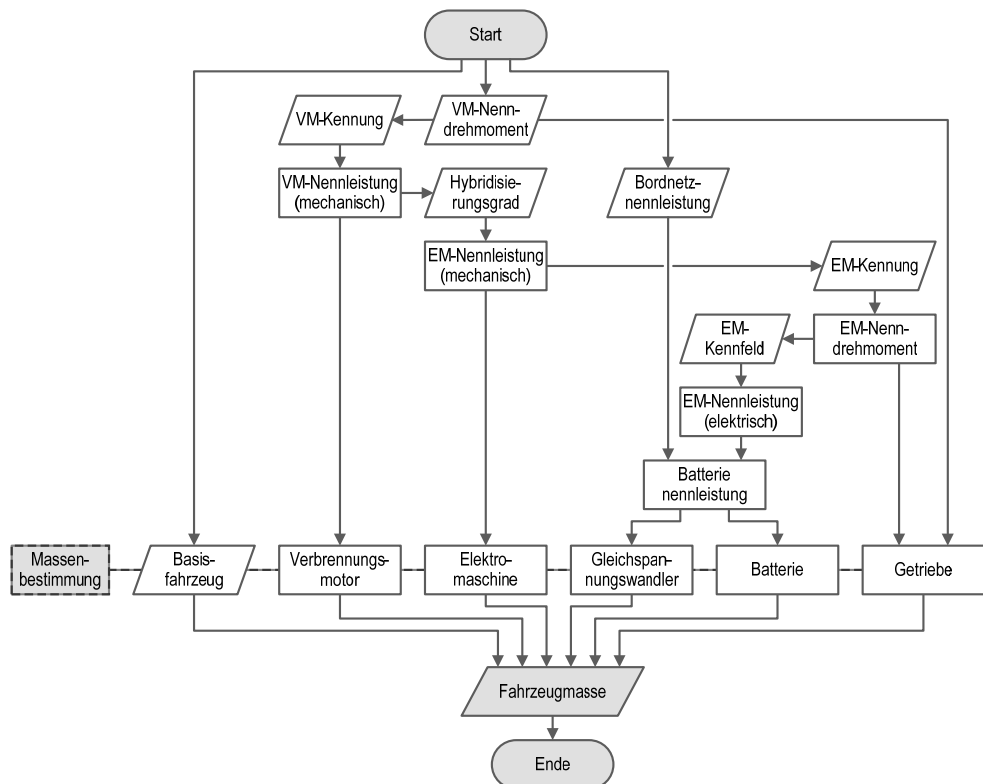
Ausnahmen bilden im Szenario „Zukunft“ (siehe Abschnitt 6.1) die Beschleunigungszeiten bei PAH-D im C-Segment sowie bei BEV im A- und C-Segment. Diese unterschreiten die geforderten Werte um 0,42 s (PAH-D), 0,13 s (BEV, A-Segment) beziehungsweise 0,12 s (BEV, C-Segment). Die Begründung liegt in höheren Antriebsleistungen, die erforderlich sind, um die geforderte Höchstgeschwindigkeit zu erreichen. **Bild 5-4** zeigt den Programmablaufplan der Skalierungsroutine.

Für das beschriebene Vorgehen wird ein zu diesem Zweck erstellter Fahrzyklus mit einem Sprung der Sollgeschwindigkeit von null auf die Maximalgeschwindigkeit eingesetzt. Alle nicht zum Betrieb des Fahrzeugs notwendigen Bordnetzverbraucher bleiben dabei abgeschaltet, so dass nur von einer geringen Grundlast im Bordnetz ausgegangen wird.

Bild 5-5: Programmablaufplan der Massenbestimmung von Antriebskomponenten.

Darstellung für PAH.

EM: Elektromaschine; VM: Verbrennungsmotor.



Bei PAH und FCV muss die Höchstgeschwindigkeit aus der Leistungsfähigkeit der Hauptaggregate, also des Verbrennungsmotors bei PAH und des Brennstoffzellensystems bei FCV, gehalten werden können. Bei BEV wird zusätzlich die Reichweite geprüft und gegebenenfalls auf dem Weg der Anpassung der Batteriekapazität mit dem vorgegebenen Wert in

Übereinstimmung gebracht. Basis für diese Bestimmung ist der Europäische Fahrzyklus MVEG.

Im Zusammenspiel mit der Bestimmung der Leistungsklassen werden die Massen der Antriebskomponenten ermittelt. Dazu wurde das Vorgehen gemäß **Bild 5-5** entwickelt, hier dargestellt für PAH. Für ICV, BEV und FCV vereinfachen sich die Verfahren und werden hier nicht dargestellt.

5.5 Komponentenmodelle

Die nachfolgenden Ausführungen fassen die Umsetzung der in den vorangegangenen Kapiteln erläuterten Grundlagen der Systemkomponenten in den Simulationsmodellen zusammen. Sie bilden die Basis für die Entwicklung der verbrauchsoptimierenden Laststeuerung, die im Abschnitt 5.7 beschrieben wird.

5.5.1 Verbrennungsmotor

Wie im Abschnitt 3.7 erläutert, wird der Momentanwert der VM-Drehzahl zur Bestimmung des drehzahlabhängig maximal möglichen Drehmoments laut Motorkennung einerseits und in Kombination mit dem Momentanwert des VM-Drehmoments zur Verbrauchsbestimmung andererseits benötigt. Im dynamischen Antriebsstrangmodell werden die als Ergebnis der optimierenden Laststeuerung ausgegebenen Sollwerte der Getriebeeingangs- (GTE-) Momente¹ auf die Einhaltung der Betriebsgrenzen laut Motorkennung $M_{VM,max} = f(\omega_{VM})$ hin geprüft und gegebenenfalls begrenzt. Für ICV gilt folgende Gleichung:

$$M_{VM,GTE} = \begin{cases} \min(M_{VM,GTE,soll}, M_{VM,max}(\omega_{VM})), & M_{VM,GTE,soll} \geq 0 \\ M_{schlepp}, & M_{VM,GTE,soll} < 0 \end{cases} \quad (5-1)$$

Bei PAH wird im Falle negativer Bedarfsmomente mit der Annahme, dass der VM dann ausgekuppelt ist, $M_{VM,GTE}$ zu null gesetzt. An der Elektromaschine ist dann eine höhere rekuperierbare Leistung verfügbar. Auf die Verbrauchsbestimmung des VM hat dies keinen Einfluss, da im Schleppbetrieb aufgrund der Schubabschaltung, die Kraftstoffzufuhr unterbrochen ist.

Bei Simulationsdurchläufen hat sich gezeigt, dass bei Erreichen der maximalen Geschwindigkeit am Ende des Drehzahlbereichs im höchsten Gang das System zu schwingen beginnt. Dieses Verhalten kann mit dem – laut Motorkennung – abrupten Absinken des maximalen

¹ Es wird in dieser Arbeit angenommen, dass das Getriebeeingangsmoment gleich dem Maschinenmoment ist. Das Modell kann jedoch Verbrennungsmotorzusatzmomente, beispielsweise für Nebenaggregate des VM, berücksichtigen. Dann ist das VM-Moment größer als das GTE-Moment. Dies wird sowohl bei der Prüfung auf Einhaltung der Betriebsgrenzen im dynamischen Antriebsstrangmodell als auch bei der Bestimmung optionaler Betriebspunkte in der optimierenden Laststeuerung berücksichtigt.

Drehmoments auf null in diesem Betriebspunkt erklärt werden. Als zusätzlicher Funktionsblock zur Stabilisierung der Berechnung wurde daher ein lineares Absinken des maximalen Drehmoments auf null ab einer definierten Grenzdrehzahl nahe der maximalen Drehzahl eingefügt. Um noch gültige Werte zur Verbrauchsbestimmung zu erhalten, muss diese Grenzdrehzahl kleiner als die maximale Drehzahl sein. Die hier gewählten Grenzdrehzahlen liegen jeweils um den Betrag 100 min^{-1} unterhalb der maximalen Motordrehzahlen von 4500 min^{-1} bei Dieselmotoren und 6000 min^{-1} bei Ottomotoren.

Die Bestimmung der VM-Drehzahl erfolgt im Regelfall aus der mit der Fahrgeschwindigkeit gegebenen Raddrehzahl ω_R und der Gesamtübersetzung i_{ges} . Dazu wird hier die Getriebeeingangsdrehzahl definiert:

$$\omega_{GTE} = \omega_R \cdot i_{ges} \qquad i_{ges} = i_{AT} \cdot i_{GT}(x_{GT}) \qquad (5-2)$$

Erläuterung der Indices:

<i>GTE</i>	am Getriebeeingang
<i>ges</i>	gesamt
<i>AT</i>	Achsantrieb
<i>GT</i>	Getriebe (x_{GT} : Getriebestufe)

Außer beim Anfahren ist die VM-Drehzahl gleich der GTE-Drehzahl. Zu Anfahrzwecken und bei Fahren im ersten Gang wird die VM-Mindestdrehgeschwindigkeit berücksichtigt. Es gelten folgende Definitionen:

$$\omega_{VM} = \begin{cases} \max(\omega_{GTE}, \omega_{VM,min}^{vtb}), & 0 < M_{VM,GTE}^{soll} \leq M_{VM,max}(\omega_{VM,min}^{vtb}) \\ \max(\omega_{GTE}, \omega_{VM}(M_{VM,max})), & M_{VM,max}(\omega_{VM,min}^{vtb}) < M_{VM,GTE}^{soll} \\ \max(\omega_{GTE}, \omega_{VM,Lrl}), & M_{VM,GTE}^{soll} \leq 0 \end{cases} \qquad (5-3)$$

Erläuterung der Indices:

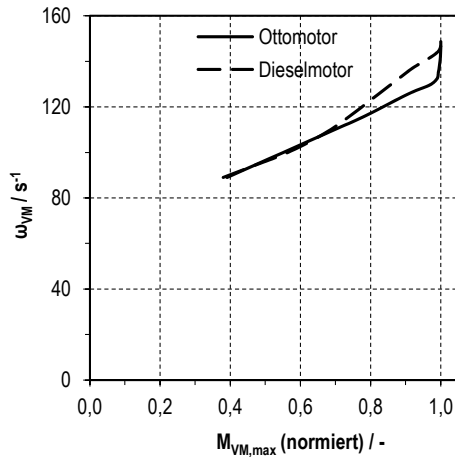
<i>ges</i>	gesamt	<i>GTE</i>	am Getriebeeingang
<i>max</i>	Maximalwert	<i>Lrl</i>	bei Motorleerlauf
<i>min</i>	Mindestwert	<i>R</i>	bezogen auf das Rad
<i>soll</i>	Sollwert	<i>VM</i>	Verbrennungsmotor
<i>vtb</i>	im Vortriebsfall ($Z > 0$)		

Im ersten Fall von Gleichung 5-3 gilt bei einem GTE-Sollmoment, welches kleiner oder gleich dem maximalen Drehmoment bei gegebener Mindestanfahrtdrehzahl ist, dass die Motordrehzahl gleich dem gegebenen Mindestwert im Vortriebsfall ist. Im zweiten Fall, bei einem GTE-Sollmoment, das größer als das maximale Drehmoment bei gegebener Mindestanfahrtdrehzahl ist, wird das folgende Vorgehen gewählt: zur Erhöhung des Anfahrmoments kann die Drehzahl entlang der Motorkennung bis zum Punkt des maximalen Drehmoments angehoben werden. Dies ist insbesondere bei Volllastsimulationen der Fall. Zur Realisierung dieses Verhaltens wurde die Umkehrfunktion der Motorkennung als Kennlinie im Modell abgelegt.

Der Definitionsbereich der Umkehrfunktion beschränkt sich dabei auf die monoton steigenden Drehmomentwerte (siehe **Bild 5-6**). Im letzten Fall, bei einem GTE-Sollmoment, das kleiner als null ist, ist die VM-Drehzahl gleich der GTE-Eingangsdrehzahl und sinkt nicht unter die Leerlaufdrehzahl ab.

Bild 5-6: Umkehrfunktion der Motorkennung im Bereich monoton steigender Drehmomentwerte.

Werte auf Basis der Darstellung in Bild 3-8; Quelle bezüglich Motorkennung: [66, 67].



Das ermittelte Verbrennungsmotormoment wird gemeinsam mit der Motordrehzahl als Ist-Wert an den Datenbus übergeben und im *subsystem* „Evaluation“ (siehe Bild 5-2, S. 74) mithilfe des Verbrauchskennfelds bezüglich des Kraftstoffverbrauchs bewertet.

5.5.2 Elektromaschinen

Im Gegensatz zu Verbrennungsmotoren steht bei Elektromaschinen der gesamte Drehzahlbereich zur Verfügung. Anfahrlemente werden nicht benötigt, wodurch sich eine wesentlich vereinfachte Drehzahlermittlung ergibt. Deutlich komplexer gestaltet sich jedoch die Ermittlung des maximalen Drehmoments. Da je nach Batterieladezustand und elektrischer Bedarfsleistung im Bordnetz die maximal zur Verfügung stehende elektrische Leistung variieren kann, ist eine Erweiterung der Abhängigkeit des maximalen Drehmoments um die Dimension der elektrischen Leistung notwendig

$$M_{EM,max} = f(\omega_{EM}, P_{Zwk,max}^e) \quad \text{allgemeine Form} \quad (5-4)$$

$$M_{EM,mot,max} = f(\omega_{EM}, P_{Zwk,pos,max}^e) \quad \text{im Motorbetrieb} \quad (5-5)$$

$$|M_{EM,gen}|_{max} = f(\omega_{EM}, |P_{Zwk,neg}|_{max}^e) \quad \text{im Generatorbetrieb} \quad (5-6)$$

Erläuterung der Indices:

gen im Generatorbetrieb

<i>max</i>	Maximalwert
<i>mot</i>	im Motorbetrieb
<i>neg</i>	negative Werte (Leistungsfluss entgegen der positiven Zugkraftichtung)
<i>pos</i>	positive Werte (Leistungsfluss in positiver Zugkraftichtung)
<i>EM</i>	Elektromaschine
<i>Zwk</i>	Zwischenkreis

Dazu muss zunächst das vorhandene Wirkungsgradkennfeld

$$\eta_{EM} = f(\omega_{EM}, M_{EM}) \quad (5-7)$$

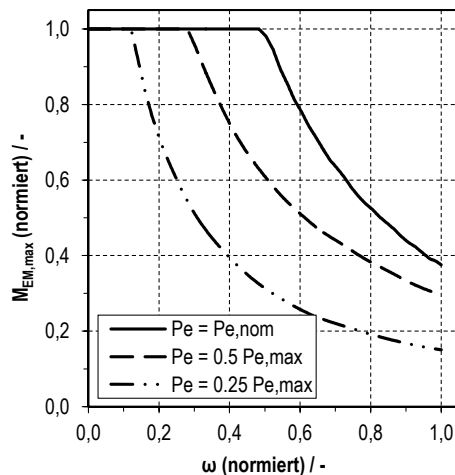
in die nachfolgend dargestellte Form überführt werden, wobei gemäß der Vorzeichenkonvention (Tab. 5-1, S. 71) $M_{EM} > 0$ für Motorbetrieb und $M_{EM} < 0$ für Generatorbetrieb gilt.

$$P_{EM}^e = f(\omega_{EM}, M_{EM}) = \begin{cases} \frac{\omega_{EM} \cdot M_{EM}}{\eta_{EM}(\omega_{EM}, M_{EM})}, & M_{EM} > 0 \\ \omega_{EM} \cdot M_{EM} \cdot \eta_{EM}(\omega_{EM}, M_{EM}), & M_{EM} < 0 \end{cases} \quad (5-8)$$

Zusammen mit einem die y-Werte repräsentierenden neu zu erstellenden Vektor P_{EM}^{e*} elektrischer Leistungen lässt sich das Kennfeld neu aufbauen. Dabei wird für jedes ω_{EM} die Funktion $P_{EM}^e(M_{EM})$ ausgelesen und durch lineare Interpolation die Umkehrfunktion $M_{EM}^*(P_{EM}^{e*})$ gebildet. Auch hier sind die Funktionswerte nur für monoton steigende P_{EM}^e gültig. Die Funktionsweise dieses Kennfelds macht **Bild 5-7** deutlich. Bei reduziertem Angebot an elektrischer Leistung verschiebt sich die Kurve des maximalen Drehmoments der Elektromaschine in Richtung kleinerer Werte.

Bild 5-7: Maximales Drehmoment der Elektromaschine in Abhängigkeit von der Drehgeschwindigkeit und vom elektrischen Leistungsangebot.

„Pe = Pe,nom“ für den Fall, dass mindestens die elektrische Nennleistung der Elektromaschine zur Verfügung steht. Darstellung nur für Motorbetrieb.



Die Begrenzung der maximalen Drehzahl erfolgt analog zum Vorgehen bei Verbrennungsmotoren mithilfe eines Funktionsblocks, der ein lineares Absinken des maximalen Drehmoments nahe der maximalen Drehzahl bewirkt.

5.5.3 Kraftübertragung

In Unterabschnitt 3.7.3 wurde festgelegt, dass Getriebeverluste je Stirnradpaar und in Abhängigkeit des Eingangs Drehmoments berücksichtigt werden. Für das Getriebe wird angenommen, dass stets zwei Stirnradpaare im Eingriff sind. Insgesamt muss die Verlustrechnung also zweimal für das Getriebe und einmal für die Achsübersetzung durchgeführt werden. Bei genauerer Kenntnis des Getriebes kann die Zahl der im Eingriff befindlichen Radpaare auch abhängig von der Getriebestufe variiert werden. Die Umkehrfunktion der Verlustrechnung wird bei der Bestimmung optionaler Maschinenmomente, dann bei gegebenem Ausgangsdrehmoment, verwendet (siehe Unterabschnitt 5.7.3).

5.5.4 Brennstoffzellensystem

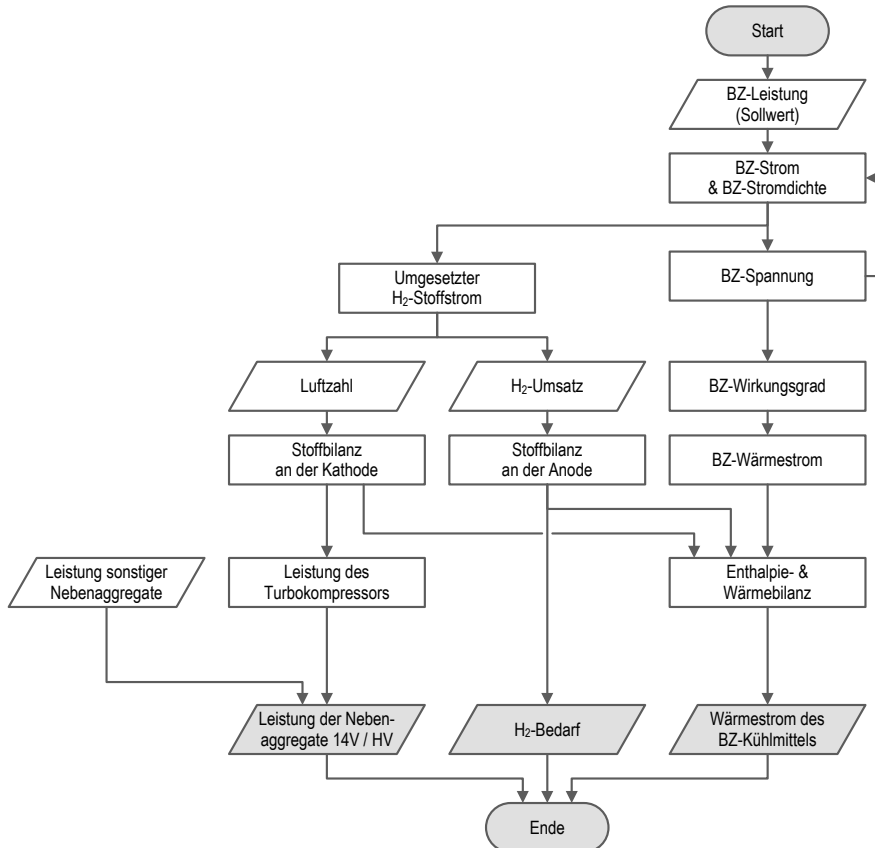
Das Teilmodell Brennstoffzellensystem erhält als Eingangssignal die angeforderte elektrische Leistung, die unter Nutzung der Spannung des BZ-Stapels in einen Sollstrom umgerechnet wird. Auf dessen Basis lässt sich der umgesetzte Wasserstoff $\dot{n}_{H_2,u}$ und, mithilfe der Brennstoffnutzung an der Anode, der zuzuführende molare Wasserstoffstrom $\dot{n}_{H_2}^\alpha$ errechnen. Letzterer wird zur Verbrauchsbestimmung herangezogen. Der umgesetzte Wasserstoffstrom bildet die Basis für die energetische Bilanzierung gemäß den Gleichungen in Unterabschnitt 3.8.2. Den Programmablaufplan zeigt **Bild 5-8**. Das verwendete Gleichungsmodell einschließlich der eingesetzten Kennlinien enthält Unterabschnitt 3.8.2.

Als Nebenaggregate des BZ-Systems werden der Turbokompressor zeitabhängig sowie Kühlmittelpumpe, Kühlerventilator, Steuergeräte und Dosiereinrichtungen mit einem Durchschnittswert berücksichtigt. Die zugehörigen Werte sind in Tab. 3-6, S. 26 dargestellt.

Stoffströme, spezifische Enthalpien und molare Massen werden in einer bezüglich der Reihenfolge der Gasgemischkomponenten standardisierten Vektorform dargestellt, die ein vereinfachtes Verfahren der Massen und Enthalpiebilanzierung mithilfe des Skalarprodukts erlaubt und so Fehlerquellen reduzieren hilft.

Bild 5-8: Programmablaufplan des Teilmodells Brennstoffzellensystem.

BZ: Brennstoffzellenstapel.



5.5.5 Batterie

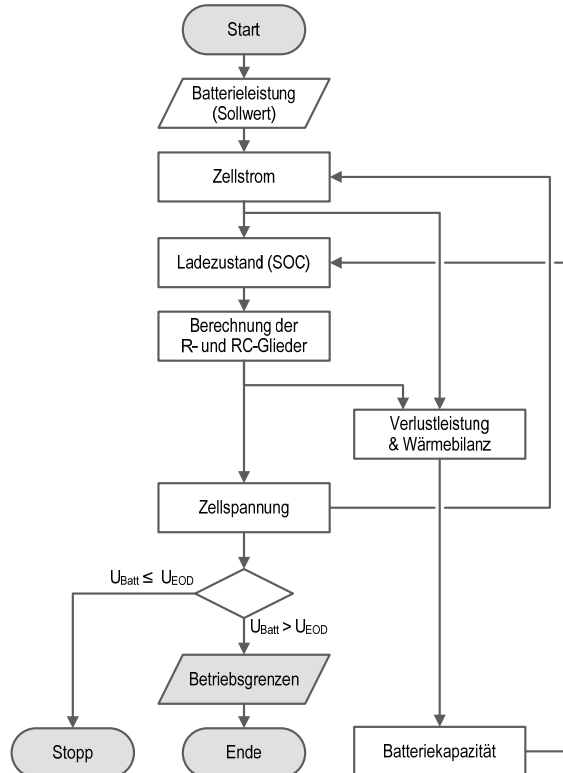
Das Eingangssignal des Teilmodells Batterie ist die elektrische Bedarfs- beziehungsweise Überschussleistung im Hochspannungsbordnetz. Die verwendeten Gleichungen sind in Unterabschnitt 3.8.1 zu finden. Den Berechnungsablauf zeigt **Bild 5-9**.

Die Grenzen der Lade- beziehungsweise Entladeleistung der Batterie sind in der optimierenden Laststeuerung bereits berücksichtigt, so dass der Wertebereich dieses Signals entsprechend der momentanen Leistungsfähigkeit der Batterie eingeschränkt ist. Das heißt, es treten an dieser Stelle nur elektrische Leistungen auf, die innerhalb der Betriebsgrenzen der Batterie liegen. Eine Nutzung der Abwärme der Batterie wird aufgrund des nur kleinen Betrags und des geringen Temperaturniveaus nicht betrachtet. Das Batteriemodell enthält eine Abbruchbedingung, die bei Erreichen der Entladeschlussspannung U_{EOD} die Simulation anhält. Diese Funktion wird zur Ermittlung der BEV-Reichweite benötigt. Alle anderen Mo-

delle enthalten eine Ladezustandssteuerung, die das Erreichen der Entladeschlussspannung verhindert.

Bild 5-9: Programmablaufplan des Teilmodells Batterie.

U_{EOD} : Entladeschlussspannung (*End of discharge voltage*); U_{Batt} : Batteriespannung.



5.5.6 Leistungselektronik

Um eine flexible Steuerung elektrischer Leistungen im Hochspannungsnetz zu gewährleisten sind Gleichspannungsquellen über einen Gleichspannungswandler (GW) mit dem Hochspannungsbordnetz verbunden (siehe Unterabschnitt 3.8.3). Bei PAH und BEV ist dementsprechend ein GW an der Batterie zu berücksichtigen. Bei FCV verfügen sowohl das Brennstoffzellensystem als auch die Batterie über einen GW (siehe Tab. 3-5, S. 25). Die Dimensionierung entspricht dem maximalen Betrag der elektrischen Leistung der Spannungsquellen. Darüber hinaus wird ein Gleichspannungswandler zur Versorgung des 14 V-Bordnetzes benötigt. Dessen Skalierung richtet sich nach der Summe der elektrischen Leistungen aller versorgten Verbraucher (siehe Tab. 3-6, S. 26). Bei ICV ist kein GW erforderlich.

Im Gesamtfahrzeugmodell wird das an den Betrieb der Batterie gekoppelte Teilmodell Gleichspannungswandler mehrfach benötigt:

- zur Berechnung der momentanen Batterieleistung:

$$P_{Batt}^e = f(P_{HSN}^e) = \begin{cases} P_{HSN}^e \cdot \eta_{GW}, & P_{HSN}^e \leq 0 \\ \frac{P_{HSN}^e}{\eta_{GW}}, & P_{HSN}^e > 0 \end{cases} \quad (5-9)$$

P_{Batt}^e Batterieleistung (nach GW)

P_{HSN}^e elektrische Leistung im Hochspannungsnetz (vor GW)

- bei der Ermittlung der Batteriebetriebsgrenzen bezogen auf das Hochspannungsbordnetz¹:

$$P_{HSN}^e = (P_{Batt}^e) = \begin{cases} P_{Batt,obg}^e \cdot \eta_{GW}, & P_{Batt}^e \geq 0 \\ \frac{P_{Batt,ubg}^e}{\eta_{GW}}, & P_{Batt}^e < 0 \end{cases} \quad (5-10)$$

$P_{HSN,obg}^e$ obere Batteriebetriebsgrenze nach GW²

$P_{Batt,obg}^e$ obere Batteriebetriebsgrenze vor GW

$P_{HSN,ubg}^e$ untere Batteriebetriebsgrenze nach GW

$P_{Batt,ubg}^e$ untere Batteriebetriebsgrenze vor GW

Die auf das Hochspannungsnetz bezogenen Batteriebetriebsgrenzen werden in jedem Simulationszeitschritt ermittelt und dienen der Bestimmung optionaler Betriebspunkte der Elektromaschine bei PAH und BEV sowie von Elektromaschine und Brennstoffzellenstapel bei FCV. Das dazugehörige Verfahren wird in Unterabschnitt 5.7.5 näher erläutert. Die Batteriebetriebsgrenzen vor dem Gleichspannungswandler werden als Momentanwerte mithilfe des maximal und minimal möglichen Batteriestroms und der Batteriespannung ermittelt.

Im Falle des FCV ist die geforderte Brennstoffzellenleistung das Eingangssignal des GW. Die im Hochspannungsnetz verfügbare Leistung des Brennstoffzellenstapels wird wie folgt definiert:

$$P_{BZ,net}^e = P_{BZ,brt}^e \cdot \eta_{GW} \quad (5-11)$$

Erläuterung der Indices

¹ Diese Betriebsgrenzen definieren die maximalen Beträge von Überschuss- oder Bedarfsleistung im Hochspannungsnetz, die nach Berücksichtigung der GW-Verluste von der Batterie aufgenommen oder abgegeben werden können.

² Der Zusatz „vor GW“ beziehungsweise „nach GW“ bezieht sich in Übereinstimmung mit der Vorzeichenkonvention auf die positive Richtung des Antriebsenergieflusses. „Vor“ bedeutet demnach an den Batterieklemmen, „nach“ hingegen am GW-Ausgang, also auf der Spannungsebene des Hochspannungsbordnetzes.

<i>BZ</i>	BZ-Stapel
<i>net</i>	elektrische Nettoleistung (im Hochspannungsnetz verfügbar)
<i>brt</i>	elektrische Bruttoleistung (Leistungsabgabe des BZ-Stapels)

5.6 Thermische Integration

Eine Möglichkeit der Ermittlung der an die Kabinenluft übertragbaren Wärme wird von Großmann (2010) [62] erläutert. Ausgehend von Messwerten kann der Wärmeübergang eines Heizwärmeübertragers vereinfacht wie folgt bestimmt werden:

$$k \cdot A \approx \frac{1}{\frac{a}{\dot{m}_L^m} + \frac{b}{\dot{m}_{KLM}^n}} \quad (5-12)$$

$k \cdot A$	Produkt aus Wärmedurchgangskoeffizient und Wärmeübertragerfläche
$\dot{m}_{L KLM}$	Luft- beziehungsweise Kühlmittelmassenstrom [$kg \ s^{-1}$]
a	Koeffizient, $a = 1,7216$ [62, S. 252ff.]
b	Koeffizient, $b = 0,2124$ [62, S. 252ff.]
m, n	Koeffizienten, $m = n = 0,8$ [62, S. 252ff.]

Es wird angenommen, dass diese Gleichung für alle hier zur Abwärmenutzung herangezogenen Komponenten gilt. Die Skalierung erfolgt unter Nutzung der maximalen Abwärme der jeweiligen Komponente. Wärmeverluste durch Strahlung werden hier nicht berücksichtigt. Bei Verbrennungsmotoren wird vereinfachend davon ausgegangen, dass ein Drittel der Kraftstoffenergie als thermische Energie mithilfe des Kühlmittels abgeführt werden muss. Bei Elektromaschinen wird die gesamte Abwärme an das Kühlmittel übertragen. Die Abwärme des Brennstoffzellenstapels wird unter Berücksichtigung der Enthalpiebilanz des BZ-Stapels berechnet (siehe Unterabschnitt 3.8.2).

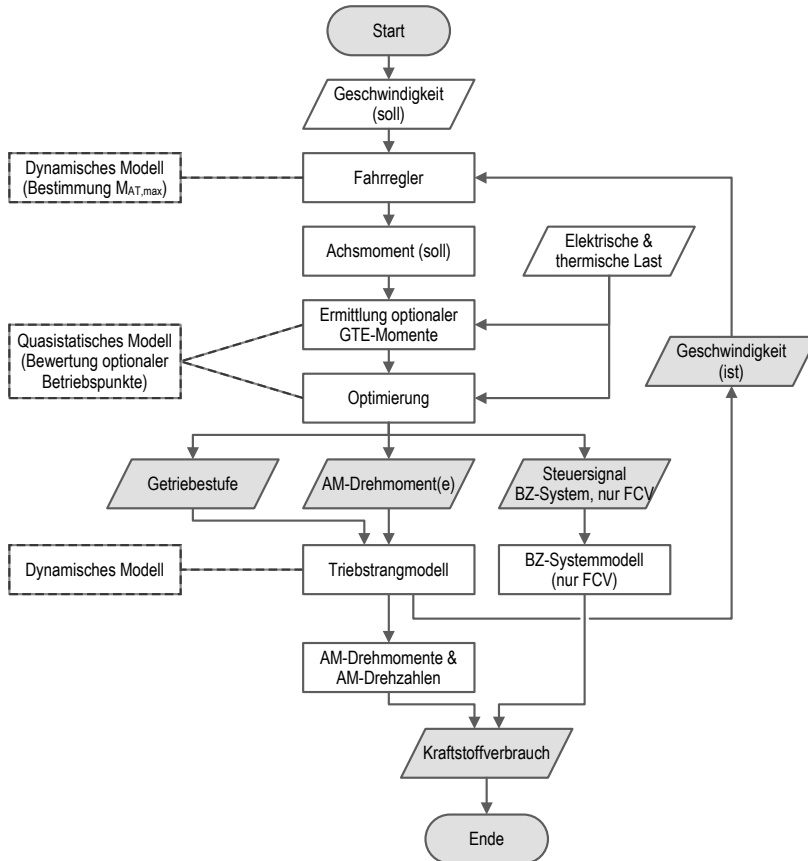
5.7 Verbrauchsoptimierende Laststeuerung

In der Aufgabenstellung im Abschnitt 1.1 wurde festgelegt, dass sich verwendete Betriebsstrategien ausschließlich auf Momentanwerte von Betriebsgrößen der Systemkomponenten stützen sollen. In Unterabschnitt 4.1.2 wurde der in dieser Arbeit verwendete Ansatz zur Entwicklung von Betriebsstrategien als instantan-analytisch definiert, der durch einfache heuristische Regeln zur Ladezustandssteuerung der Batterie ergänzt wird. Nachfolgend soll das grundsätzliche Vorgehen bei der Umsetzung der Betriebsstrategien, einschließlich der erforderlichen Optimierungsverfahren, erläutert werden.

Um eine möglichst große Flexibilität zur Anwendung des Optimierungsverfahrens zu erhalten wird das Vorgehen gemäß dem Programmablaufplan in **Bild 5-10** gewählt.

Bild 5-10: Struktur der Simulationsmodelle, dargestellt als vereinfachter Programmablaufplan.

Blöcke mit gestrichelter Umrandung klassifizieren die eingesetzten Teilmodelle entsprechend den Begriffsbestimmungen im Abschnitt 2.1; konzeptspezifische Programmablaufpläne, siehe Unterabschnitte 5.8.1 ff.; $M_{AT,max}$: maximales Achsmoment; **AM**: Antriebsmaschine(n); **BZ**: Brennstoffzellen; **GTE**: Getriebeeingang.



Die Bestimmung der Sollwerte der Antriebsmaschinen lässt sich als Abfolge von Berechnungsschritten darstellen, die in den nachfolgenden Abschnitten detailliert erläutert werden:

1. Bestimmung des Achsmoments unter Berücksichtigung der Grenzen der Kraftübertragung zwischen Rad und Straße (Unterabschnitt 5.7.2)
2. Umrechnung des Achsmoments in optionale Getriebeeingangs (GTE-) Momente (Unterabschnitt 5.7.3); die Beschleunigung rotierender Massen wird berücksichtigt
3. Ermittlung der, bezüglich der Einhaltung der Betriebsgrenzen der Systemkomponenten, gültigen GTE-Momente beziehungsweise BZ-Systemleistungen (Unterabschnitt 5.7.4 und 5.7.6)
4. Energetische Optimierung des Gesamtsystems unter Einbeziehung der erforderlichen thermischen und elektrischen Lasten des Fahrzeugs (Unterabschnitt 5.7.5 und 5.7.7)
5. Bestimmung der Sollwerte für Antriebsmaschinen (Unterabschnitt 5.7.6)

Dieses Vorgehen soll sicherstellen, dass zum einen die technischen Grenzen des Antriebs voll ausgenutzt werden können. Zum anderen werden auf diese Weise nur Sollwerte an Antriebsmaschinen ausgegeben, die mit Bezug auf deren Betriebsgrenzen zulässige Werte darstellen. Volllastsimulationen, die das gesamte Zugkraftpotential des Antriebs erfordern, und Fahrzyklussimulationen sind damit möglich.

Wie **Bild 5-10** auch zeigt, sind die Ausgangsgrößen der Optimierung die zu wählende Getriebestufe und das VM-Drehmoment bei ICV, das EM-Drehmoment bei BEV und FCV beziehungsweise das VM- und EM-Drehmoment bei PAH. Grundlage für deren Bestimmung ist die Analyse des Kraftstoffnutzungsgrades für jeden Zeitschritt der Simulation. Im Ergebnis dieser Berechnung wird für jede Gangstufe der zeitabhängige Verlauf des maximalen Nutzungsgrades ausgegeben, der zur Bestimmung der optimalen Gangstufe genutzt wird. Zusätzlich werden als separates Signal auch die maximalen Drehmomente ausgegeben. Diese werden zur Steuerung der Volllastbeschleunigung benötigt, die unabhängig von der optimierenden Betriebsstrategie arbeitet.

5.7.1 Definition von Options- und Gültigkeitsvektoren

Das Optimierungsverfahren stützt sich auf die Diskretisierung von Freiheitsgraden des Betriebs der Antriebskomponenten. Ein ähnliches Verfahren wurde in [118, S. 98] angewandt. Bei ICV liegen die den Freiheitsgrad repräsentierenden Getriebeübersetzungen bereits in Form fester Gangstufen vor. Bei Hybriden stellen sich Freiheitsgrade typischerweise als kontinuierliche Bereiche dar, wie zum Beispiel als Überlagerungsbereich von VM und EM beim Parallelhybrid oder als Übersetzungsbereich eines leistungsverzweigenden Hybridkonzepts. Im Falle kontinuierlicher Bereiche müssen geeignete Diskretisierungen entworfen werden. In dieser Arbeit werden dazu, im Weiteren als Optionsvektoren bezeichnete, vektorisierte Parameter in der folgenden Form definiert:

- Optionsvektor des Getriebeeingangsmoments für alle Konzepte:

$$M_{GTE}^{opt} = (M_{GTE}|_{x=1}, M_{GTE}|_{x=2}, \dots, M_{GTE}|_{x=z}) \quad (5-13)$$

Erläuterung der Indices:

opt	Optionsvektor
GTE	am Getriebeeingang
x	Gangstufe ($1 \leq x \leq z$; $x \in \mathbb{Z}$)
z	Zahl der Gangstufen

- Optionsvektor der Drehgeschwindigkeiten am Getriebeeingang für alle Konzepte:

$$\omega_{GTE}^{opt} = (\omega_{GTE}|_{x=1}, \omega_{GTE}|_{x=2}, \dots, \omega_{GTE}|_{x=z}) \quad (5-14)$$

- Optionsvektor des EM-Drehmoments für PAH:

$$M_{EM}^{opt,0} = (M_{EM,min}, M_{EM,min} + \Delta M_{EM}^{opt}, \dots, M_{EM,max}) \quad (5-15)$$

Erläuterung der Indices:

0	kennzeichnet den Optionsvektor ohne Erweiterungen (Erweiterungen siehe Unterabschnitt 5.7.4)
EM	Elektromaschine
min	Minimalwert
max	Maximalwert

- Optionsvektor der Brennstoffzellensystemleistung:

$$P_{BZS}^{e,opt} = (P_{BZS,min}^e, P_{BZS,min}^e + \Delta P_{BZS}^{e,opt}, \dots, P_{BZS,max}^e) \quad (5-16)$$

Erläuterung der Indices:

BZS	Brennstoffzellensystem
$min max$	untere beziehungsweise obere Grenze des Betriebsbereichs

Die Schrittweite des Optionsvektors $\Delta M_{EM}^{opt,0}$ wird mit $1 Nm$ und die des Optionsvektors P_{BZ}^{opt} mit $1 kW_e$ festgelegt. Die Besonderheit des Optionsvektors $M_{EM}^{opt,0}$ liegt darin, dass hier zunächst nur der Betriebsbereich der Elektromaschine abgedeckt wird. Zur Realisierung der Funktionalitäten des PAH-Konzepts sind jedoch Erweiterungen dieses Optionsvektors notwendig; diese werden in Unterabschnitt 5.7.4 (siehe Gleichungen 5-25 und 5-26) erläutert.

Je Optionsvektor wird ein weiterer Vektor gleicher Dimension definiert, der der Abbildung logischer Aussagen zur Gültigkeit einzelner Elemente auf den zugehörigen Optionsvektor dient. Deren Elemente sind auf den Wertebereich null und eins beschränkt, wobei null bedeutet, dass das zugehörige Element des Optionsvektors kein gültiges Element darstellt. Diese Vektoren werden nachfolgend als Gültigkeitsvektoren bezeichnet.

$$j_{M,GTE|\omega,GTE|M,EM|P_e,BZS}^{opt} = (j_1, j_2, \dots, j_{i,max}) \quad \text{mit } j_{GT}^{opt} \in \{0, 1\} \quad (5-17)$$

Der Wertebereich der Optionsvektoren wird im ersten Schritt des Optimierungsverfahrens auf die Einhaltung der Betriebsgrenzen von Wandlern und Speichern getestet. Die Teilmenge der gültigen Werte repräsentiert den Optionsumfang, dessen energetische Bewertung im zweiten Schritt die Ableitung optimierter Steuerungsparameter des Antriebskonzepts ermöglicht. Durch die konzeptspezifische Anzahl der Freiheitsgrade stellen sich damit eindimensionale (ICV, BEV und FCV) und zweidimensionale (PAH) Optimierungsprobleme. Die Besonderheit bei FCV besteht darin, dass ausgehend von der Bestimmung des Leistungsbedarfs der Elektromaschine zur weiteren Optimierung die Brennstoffzellensystemleistung variiert werden kann. Das Vorgehen dazu wird in Unterabschnitt 5.7.6 beschrieben.

5.7.2 Ermittlung des Achsmoments

Der vom Fahrregler ausgegebene Sollwert des Achsmoments wird zunächst mit dem fahrzustandsabhängigen, maximalen Achsmoment $M_{AT,max}$ aufgrund der Kraftübertragung zwischen Rad und Straße, entsprechend den Formeln 3-8 bis 3-10 im Abschnitt 3.2, verglichen und gegebenenfalls begrenzt:

$$M_{AT,soll} = \begin{cases} \min(M_{AT,Rgl}, M_{AT,max}), & M_{AT,Rgl} > 0 \\ \max(M_{AT,Rgl}, M_{AT,max}), & M_{AT,Rgl} < 0 \\ 0, & M_{AT,Rgl} = 0 \end{cases} \quad (5-18)$$

$M_{AT,Rgl}$ Sollwert des Antriebsmoments am Reglerausgang

$M_{AT,soll}$ Sollwert des Antriebsmoments nach Begrenzung durch maximale Umfangskraft am Rad

$M_{AT,max}$ maximales Drehmoment aufgrund maximaler Umfangskraft am Rad

Das aus den Betriebsgrenzen der Antriebsmaschinen resultierende maximale Achsmoment wird nicht explizit berechnet. Bei allen Modellen erfolgt diese Begrenzung als Bestandteil der Bestimmung des Getriebeeingangsmoments, die im folgenden Unterabschnitt erläutert wird.

5.7.3 Optionale Getriebeeingangsmomente und -drehzahlen

In einem invers-dynamischen Berechnungsschritt wird aus dem zuvor ermittelten Achsmoment der sich aus den Übersetzungen der Getriebestufen ergebende Optionsvektor der Getriebeeingangsmomente ermittelt. Getriebeverluste werden dabei berücksichtigt.

$$M_{GTE}^{opt} = \frac{\left(\frac{M_{AT,soll}}{\eta_{AT} \cdot i_{AT}} \right)}{\eta_{GT,xi} \cdot i_{GT,xi}} \quad (5-19)$$

Erläuterung der Indices:

AT Achsantrieb

GT, xi in Vektorform verfügbare Werte für jede Getriebestufe

Die Trägheitsmomente der rotierenden Massen entsprechend Gleichung 3-12 müssen hier als additive Last zu den optionalen GTE-Momenten laut Gleichung 5-19 berücksichtigt werden. Die optionalen Drehzahlen am Getriebeeingang werden in analoger Weise ermittelt:

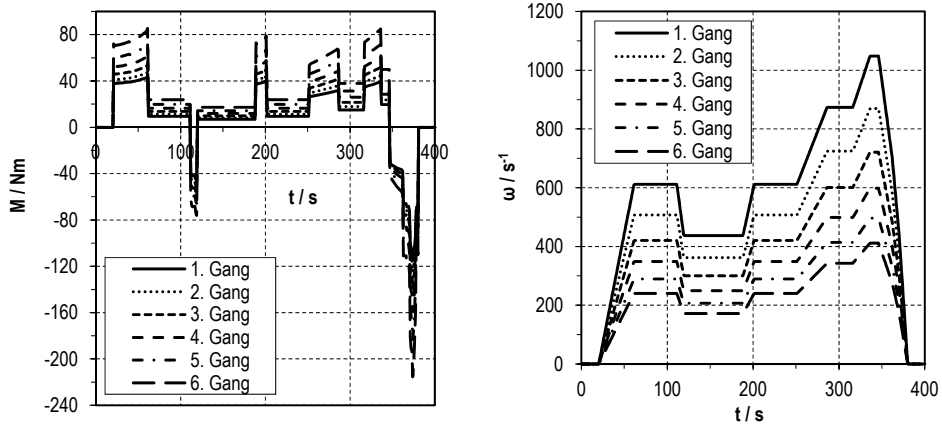
$$\omega_{GTE}^{opt} = \omega_R \cdot i_{AT} \cdot i_{GT,xi} \quad (5-20)$$

Die Berechnung optionaler GTE-Momente und -Drehzahlen erfolgt in dieser Weise für alle untersuchten Pkw-Konzepte. Zur Bestimmung des Wirkungsgrads kommen die Definitionen für das Verlustmoment laut Unterabschnitt 3.7.3 zur Anwendung.

Die Zeitverläufe der Optionsvektoren der Drehmomente und Drehzahlen am Getriebeeingang sind in **Bild 5-11** für den EUDC Fahrzyklus dargestellt. Da eine Begrenzung der GTE-Momente hinsichtlich der maximalen Maschinenmomente noch nicht erfolgt ist, stellen die Werte im linken Diagramm von **Bild 5-11** noch die Sollwerte ausgehend vom Sollwert des Achsmoments laut Gleichung 5-18 dar.

Bild 5-11: Optionale Getriebeeingangsmomente (links) und -drehzahlen (rechts) im Fahrzyklus EUDC.

Getriebeeingangsmomente stellen an dieser Stelle die Sollwerte auf Basis des Fahrreglerausgangs dar. Berechnung unter Nutzung des PAH Modells mit Ottomotor für Pkw des C-Segments.



5.7.4 Optionale Drehmomente der Antriebsmaschinen

Wie zuvor dargestellt, wird der zeitabhängige Verlauf des – im Falle PAH maximalen – Kraftstoffnutzungsgrades für jede Gangstufe ermittelt. Dazu wird in jedem Gesamtfahrzeugmodell eine der Gangstufenzahl entsprechende Anzahl von *subsystems* definiert. Jedem dieser *subsystems* werden die folgenden gangstufenspezifischen Eingangsgrößen zugeordnet:

- $M_{GTE}|_x$: Sollwert des Getriebeeingangsmoments, siehe Unterabschnitt 5.7.3,
- $\omega_{GTE}|_x$: Getriebeeingangsdrehzahl,
- $j_{\omega, GTE}|_x$: logisches Signal, das angibt, ob Getriebeeingangsdrehzahl der Gangstufe x im Drehzahlbereich der Antriebsmaschine liegt:

$$j_{\omega, GTE}|_x = \begin{cases} 1, & \omega_{AM, min} \leq \omega_{GTE}|_x \leq \omega_{AM, max} \\ 0, & \omega_{GTE}|_x < \omega_{AM, min} \vee \omega_{AM, max} < \omega_{GTE}|_x \end{cases} \quad (5-21)$$

Wird $j_{\omega, GTE}|_x$ direkt auf $M_{GTE}|_x$ abgebildet, dann ergibt sich die gegenüber **Bild 5-11 (links)** geänderte Darstellung in **Bild 5-12** für den ersten Gang. Demnach kann im ersten Gang im Zeitintervall von 253 s bis 364 s kein Drehmoment bereitgestellt werden, weil die zugehörige Drehzahl außerhalb des zulässigen Drehzahlbereichs des VM liegt.

Die maximalen Drehmomente der Antriebsmaschinen werden für ICV und BEV sowie für PAH in unterschiedlicher Art und Weise berücksichtigt. Bei ICV und BEV wird das GTE-Moment – vergleichbar zum Vorgehen bei der Limitierung des Sollmoments am Achsantrieb entsprechend Gleichung 5-18 – durch das maximale AM-Drehmoment begrenzt. Für ICV gilt dann folgende Beziehung:

$$M_{GTE}|_x = \begin{cases} \min(M_{GTE}|_x, M_{VM,max}(\omega_{VM})), & M_{GTE}|_x > 0 \\ 0, & M_{GTE}|_x \leq 0 \end{cases} \quad (5-22)$$

$M_{GTE}|_x$ Optionaler Sollwert des Antriebsmoments in Gangstufe x
 $M_{AM,max}(\omega_{AM})$ Maximales AM-Moment laut Motorkennung

Im Falle von BEV gelten zusätzlich beim rekuperativen Bremsen negative GTE-Drehmomente:

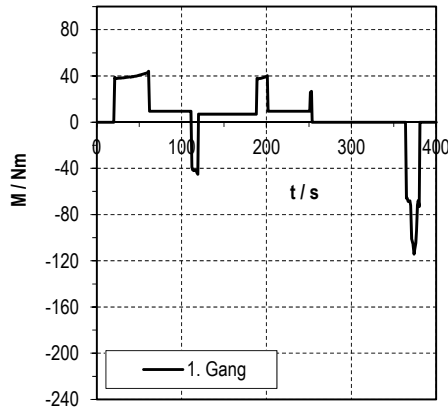
$$M_{GTE}|_x = \begin{cases} \min(M_{GTE}|_x, M_{EMM,max}(\omega_{EM})), & M_{GTE}|_x > 0 \\ \max(M_{GTE}|_x, M_{EMG,min}(\omega_{EM})), & M_{GTE}|_x \leq 0 \end{cases} \quad (5-23)$$

Wie zuvor erläutert, wird das maximale Drehmoment des Verbrennungsmotors bei ICV beziehungsweise das der Elektromaschine bei BEV und FCV als separates Ergebnis für die Vollaststeuerung bereitgestellt.

Bild 5-12: Optionales Getriebeeingangsdrehmoment des ersten Gangs im Fahrzyklus EUDC.

Hier nach Prüfung auf Einhaltung des VM-Betriebsbereichs.

Berechnung unter Nutzung des ICV Modells mit Ottomotor für Pkw des C-Segments.



Bei PAH kann der Sollwert des GTE-Moments in jeder Gangstufe auch durch Überlagerung der Drehmomente von Elektromaschine und Verbrennungsmotor realisiert werden. Die diesbezüglichen Optionen sind in Unterabschnitt 4.1.1 dargestellt worden. Dementsprechend ist auch ein gegenüber ICV und BEV verändertes Vorgehen bei der Einbeziehung der Betriebsgrenzen notwendig. Der Optionsvektor des VM-Drehmoments wird bei gegebenem Optionsvektor des EM-Drehmoments $M_{EM}^{opt}|_x$ (siehe Unterabschnitt 5.7.1) wie folgt ermittelt:

$$M_{VM}^{opt,0}|_x = M_{GTE}|_x - M_{EM}^{opt,0} \quad (5-24)$$

Die damit vorhandenen Optionsvektoren des VM- und des EM-Drehmoments werden nun, wie oben bereits dargestellt, um folgende Vektorelemente erweitert:

- Position eins: maximales VM- beziehungsweise EM-Drehmoment,
- Position zwei: AM-Drehmomente für den Fall des Batterieelektrischen (BE-) Fahrens.

Die maximalen Drehmomente werden als separate Signale für den Vollastfall benötigt. Die Verfügbarkeit dieses Signals ist allerdings beschränkt auf Fahrsituationen in denen das GTE-Moment größer oder gleich der Summe der maximalen Drehmomente von VM und EM ist. Für BE-Fahren wird das VM-Drehmoment zu null gesetzt und das EM-Drehmoment $M_{EM,BEF}$ mit $M_{EM,BEF} = M_{GTE}$ eingesetzt. Die vollständigen Optionsvektoren für PAH sind damit für jede Gangstufe x wie folgt definiert:

- für den Verbrennungsmotor:

$$M_{VM}^{opt} = (M_{VM,max}, 0, M_{VM}^{opt,0}) \quad (5-25)$$

- für die Elektromaschine:

$$M_{EM}^{opt} = (M_{EM,max}, M_{EM,BEF}, M_{EM}^{opt,0}) \quad (5-26)$$

Erläuterung der Indices:

BEF batterieelektrisches Fahren

Die Elemente dieser Optionsvektoren müssen nun bezüglich der Einhaltung der Drehmomentgrenzen geprüft werden. Bei VM erfolgt dies mithilfe der Motorkennung; für EM kommt das in Unterabschnitt 5.5.2 beschriebene Kennfeld zur Anwendung:

$$M_{EM,max} = f(\omega_{EM}, P_{Zwk,max}^e) \quad (5-4)$$

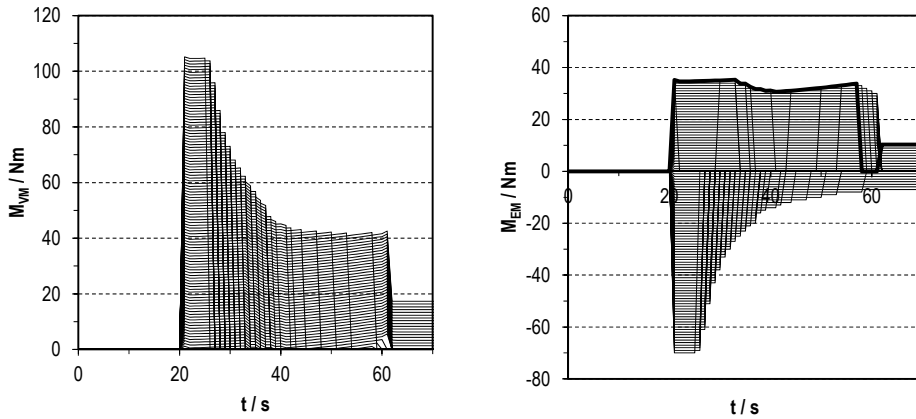
Aus der Prüfung der Einhaltung der Drehmomentgrenzen für jedes Vektorelement resultieren die Gültigkeitsvektoren j_{VM}^{opt} und j_{EM}^{opt} . Die Abbildung dieser Gültigkeitsvektoren auf die Optionsvektoren führt zum jeweiligen Wertebereich der zur Realisierung des GTE-Moments möglichen Maschinenmomente für jede Gangstufe x . **Bild 5-13** zeigt die optionalen VM- (links) und EM-Drehmomente (rechts) für die ersten 100 s des EUDC. Jede Linie repräsentiert jeweils ein Element der gültigen Wertepaare aus VM- und EM-Drehmoment, deren Summe das GTE-Moment ergibt. Negative Werte im rechten Diagramm der Abbildung bedeuten, dass die Elektromaschine im Generatorbetrieb arbeitet und damit – bei hier ausschließlich positiven GTE-Momenten – zu einer Lastpunktanhebung des VM führt.

Die im **Bild 5-13** (rechts) fettgedruckte Linie im positiven Drehmomentbereich der EM zeigt das Drehmoment für BE-Fahren. Anhand des im Zeitintervall zwischen 57 und 62 s auf null absinkenden Signals wird deutlich, dass BE-Fahren dann nicht möglich ist. Das Drehmoment liegt zwar mit 34 Nm unterhalb des zuvor bei 21 s schon erreichten Drehmoments von 35 Nm. Aufgrund der bei 57 s deutlich höheren GTE-Drehzahl ist das maximale EM-Moment

jedoch bereits reduziert (vgl. Bild 5-7) und reicht deshalb zur Realisierung des GTE-Moments nicht mehr aus.

Bild 5-13: Optionale Verbrennungsmotor- (links) und Elektromaschinendrehmomente (rechts) des ersten Gangs im Fahrzyklus EUDC.

Darstellung der ersten 70 s des EUDC; Berechnung unter Nutzung des PAH Modells mit Ottomotor für Pkw des C-Segments.



5.7.5 Energetische Bewertung des Gesamtsystems bei ICV, PAH und BEV

Mit den ermittelten optionalen Werten der Antriebsmaschinenmomente und -drehzahlen wird die Energiebilanz für die zugehörigen Betriebszustände erstellt. Entsprechend den Erläuterungen in den Abschnitten 4.2 bis 4.5 muss die Bilanz jedoch um weitere Energienutzungen im Bordnetz erweitert werden. Bei ICV betrifft das die Bereitstellung elektrischer Leistung für Bordnetz und Batterie sowie thermischer Leistung zur Kabinenheizung. Bei BEV ist nur die thermische Leistung zur Kabinenheizung zusätzlich zu berücksichtigen. Die für jede Gangstufe ermittelten Kraftstoffnutzungsgrade laut den Gleichungen 5-27 und 5-28 (siehe beispielhaft **Bild 5-14** für ICV und BEV) werden im weiteren Berechnungsablauf zur Ermittlung der optimalen Gangstufe zusammengeführt.

$$\eta_{KS,ICV}|_x = \frac{P_{GTE}^m|_x + P_{VM,KB}^{th}|_x + P_{Batt}^e|_x}{P_{VM}^{ch}|_x} \quad (\text{ICV}) \quad (5-27)$$

$$\eta_{KS,BEV}|_x = \frac{P_{GTE}^m|_x + P_{EM,KB}^{th}|_x}{P_{EM}^e|_x} \quad (\text{BEV}) \quad (5-28)$$

$\eta_{KS,ICV|BEV}$ Wirkungsgrad der Bereitstellung mechanischer, thermischer und elektrischer Leistung bezogen auf den Kraftstoffumsatz für ICV beziehungsweise BEV (Kraftstoffnutzungsgrad)

P_{GTE}^m Mechanische Leistung am Getriebeeingang

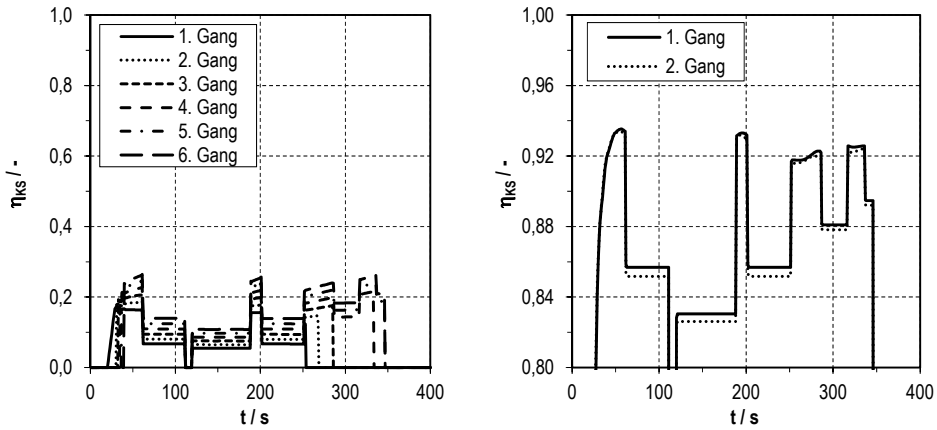
$P_{VM,KB}^{th}$ der Kabine zugeführte thermische Leistung aus VM-Abwärme

P_{Batt}^e	elektrische Batterieleistung
P_{VM}^{ch}	chemische Leistung des umgesetzten Kraftstoffs
$P_{EM,KB}^{th}$	der Kabine zugeführte thermische Leistung aus EM-Abwärme
P_{EM}^e	elektrische EM-Leistung

Die energetische Analyse optionaler Betriebspunkte bei PAH erfordert die gleichzeitige Verarbeitung von $z \cdot k_{EM}^{opt}$ Optionen, wobei k_{EM}^{opt} die Zahl der Elemente des Optionsvektors M_{EM}^{opt} ist. Es werden zunächst der maximale Wirkungsgrad sowie die zugehörigen optimalen Drehmomente für jede Gangstufe x bestimmt. Analog zum Vorgehen bei ICV und BEV wird auf Basis der resultierenden z maximalen Wirkungsgrade die optimale Gangstufe ermittelt.

Bild 5-14: Verläufe der Kraftstoffnutzungsgrade für ICV (links) und BEV (rechts) im Fahrzyklus EUDC.

Berechnung unter Nutzung des ICV- beziehungsweise BEV-Modells für Pkw des C-Segments.



Durch die Anwendung der Funktionalitäten BE-Fahren, Lastpunktanhebung (LPA) und Lastpunktreduktion (LPR) wird bei PAH außerdem die Einbeziehung der Batterie als Quelle oder Senke elektrischer Leistung in die Energiebilanz notwendig. Aus der Bilanzgleichung 3-15 (S. 24) folgt bei konstanter Spannung:

$$P_{Batt}^{e,opt}|_x = P_{EM}^{e,opt}|_x + P_{NV}^e \quad (5-29)$$

$P_{Batt}^{e,opt}|_x$ optionale elektrische Batterieleistungen, resultierend aus $P_{EM}^{e,opt}$

P_{NV}^e elektrische Leistung der Nebenverbraucher im Bordnetz

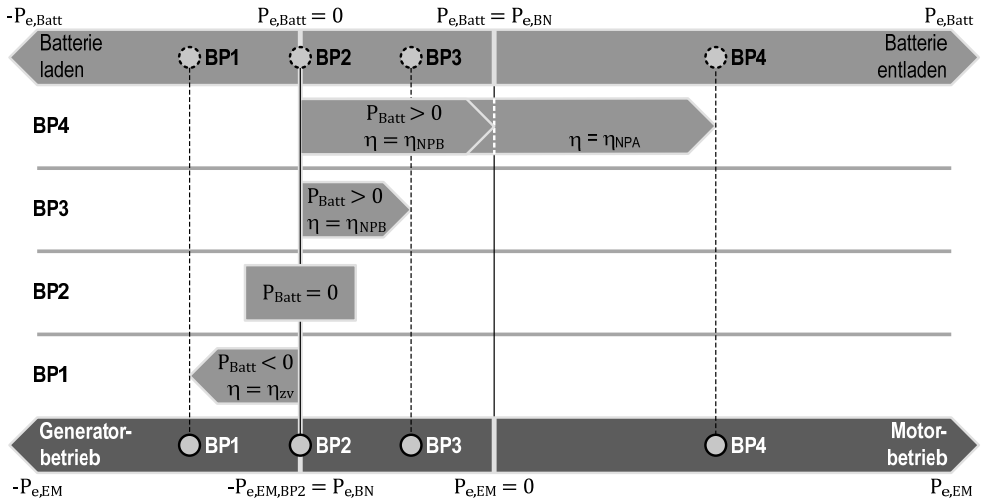
$P_{EM}^{e,opt}|_x$ Vektorelemente elektrischer Leistungen, die mithilfe des Optionsvektors $M_{EM}^{opt}|_x$, der gangstufenspezifischen Drehzahl $\omega_{EM}|_x$ und des EM-Wirkungsgrads berechnet werden.

Bild 5-15 veranschaulicht die Abbildung von Betriebspunkten der Elektromaschine auf die Batterieleistung. Nur für den Spezialfall der LPA, dass der Leistungsbedarf im Bordnetz genau der elektrischen Leistung der Elektromaschine im Generatorbetrieb entspricht, ist die

Batterieleistung gleich null. Dieser Fall wird hier nicht explizit betrachtet. Die Genauigkeit der möglichen Annäherung an diesen Fall wird durch die Schrittweite des Optionsvektors M_{EM}^{opt} bestimmt, die hier mit $1 Nm$ gewählt wurde. Ein zwischen zwei Vektorelementen liegendes Optimum würde demnach um maximal $0,5 Nm$ verfehlt werden¹.

Bild 5-15: Veranschaulichung der Bilanz elektrischer Leistungen im Hochspannungsbordnetz anhand exemplarischer Betriebspunkte.

BP: Betriebspunkt.



Zur Bestimmung des Kraftstoffnutzungsgrades für jedes Wertepaar der Optionsvektoren M_{EM}^{opt} und M_{VM}^{opt} werden Gleichungen 5-30 und 5-31 angesetzt. Aus der Bilanz der elektrischen Leistungen laut Gleichung 5-29 werden diese Wertepaare den Fällen Batterieladen ($P_{e,Batt} < 0$) und Batterieentladen ($P_{e,Batt} > 0$) zugeordnet.

$$\eta_{KS,PAH} = \frac{P_{GTE}^m + P_{KB}^{th} + P_{BN,zg}^e + P_{NPA,zv}^e + P_{NPB,zv}^e}{P_{VM}^{ch}} \quad \text{für } P_{e,Batt} < 0 \quad (5-30)$$

$$\eta_{KS,PAH} = \frac{P_{GTE}^m + P_{KB}^{th} + P_{BN,zg}^e}{P_{VM}^{ch} + \frac{P_{Batt,etl}^e}{\eta_{SBS}}} \quad \text{für } P_{e,Batt} > 0 \quad (5-31)$$

$\eta_{KS,PAH}$ Wirkungsgrad der Bereitstellung mechanischer, thermischer und elektrischer Leistung bezogen auf den Kraftstoffumsatz für PAH (Kraftstoffnutzungsgrad)

¹ Bei angenommenen GTE-Drehzahlen von 1000 min^{-1} und 6000 min^{-1} entspricht eine Drehmomentänderung von $0,5 Nm$ mechanischen Leistungen von $52 W$ beziehungsweise $314 W$. Wird der elektrische Wirkungsgrad der EM in diesen Betriebspunkten mit 90% angenommen, dann betragen die zugehörigen elektrischen Leistungen $47 W$ beziehungsweise $280 W$.

P_{KB}^{th}	in der Kabine verfügbare Heizleistung, nur im Bedarfsfall
$P_{BN,zg}^e$	elektrische Leistung zur zeitgleichen Verwendung im Bordnetz
$P_{NPA NPB,zv}^e$	elektrische Leistung zur zeitversetzten Nutzung im Antrieb oder im Bordnetz
$P_{Batt,etl}^e$	Entladeleistung der Batterie
η_{SBS}	Wirkungsgrad der Strombereitstellung der Entladeleistung

Bei negativer Batterieleistung – Batterie wird geladen – werden alle nutzbaren Leistungen auf den momentan verbrauchten Kraftstoff P_{VM}^{ch} zurückgeführt (Gleichung 5-30). Dies betrifft:

- die mechanische Leistung am Getriebeeingang, wobei $P_{EM,GTE}^m$ wegen des Generatorbetriebs ein negatives Vorzeichen führt:

$$P_{GTE}^m = P_{VM,GTE}^m + P_{EM,GTE}^m \quad (5-32)$$

- die thermische Leistung, die der Kabine zur Verfügung gestellt werden kann:

$$P_{KB}^{th} = P_{VM,KB}^{th} + P_{EM,KB}^{th} \quad (5-33)$$

- die zeitgleich zur Nutzung im Bordnetz nutzbare elektrische Leistung $P_{BN,zg}^e$
- die zeitversetzt – nach Zwischenspeicherung in der Batterie – für den Antrieb nutzbare elektrische Leistung $P_{NPA,zv}^e$,
- die zeitversetzt – nach Zwischenspeicherung in der Batterie – für das Bordnetz nutzbare elektrische Leistung $P_{NPB,zv}^e$.

Die thermische Leistung zur Kabinenheizung wird nur im Bedarfsfall berücksichtigt und entspricht der in der Kabine verfügbaren Leistung. Die Differenz zur benötigten Heizleistung (siehe Abschnitt 3.6) erhöht als thermische Residuallast die elektrische Leistung im Bordnetz. Die zeitgleich im Bordnetz nutzbare elektrische Leistung ist als Momentanwert bekannt. Zeitversetzt nutzbare Leistungen werden anhand von mittleren Wirkungsgraden ausgehend von den Gleichungen 4-6 und 4-7 bewertet, die an dieser Stelle wiederholt werden.

$$\eta_{NPA,zv} = \eta_{EMG} \cdot \eta_{GW} \cdot \eta_{Batt,ldn} \cdot \eta_{Batt,etl} \cdot \eta_{GW} \cdot \eta_{EMM} \quad (4-6)$$

$$\eta_{NPB,zv} = \eta_{EMG} \cdot \eta_{GW} \cdot \eta_{Batt,ldn} \cdot \eta_{Batt,etl} \cdot \eta_{GW} \quad (4-7)$$

Bei positiver Batterieleistung – Batterie entladen – wird zusätzlich zur momentanen Kraftstoffleistung die der Batterie entnommene Leistung mithilfe des mittleren Strombereitstellungswirkungsgrads η_{SBS} bewertet. Der Spezialfall BE-Fahren wird ebenfalls mithilfe von Gleichung 5-31 beschrieben. Dann gilt $P_{VM}^{ch} = 0$; das heißt, der Batteriestrom zur Versorgung von Antrieb und Bordnetz wird nur mit dem Erzeugungswirkungsgrad des Batteriestroms bewertet.

Bild 5-16 zeigt Zeitverläufe der Kraftstoffnutzungsgrade für PAH während der ersten 70 s des EUDC. Der linke Teil des Bildes stellt alle gültigen Elemente der Optionsvektoren im ersten Gang dar. Bis zum Zeitpunkt $t = 53 \text{ s}$ ist der Wirkungsgrad für BE-Fahren am

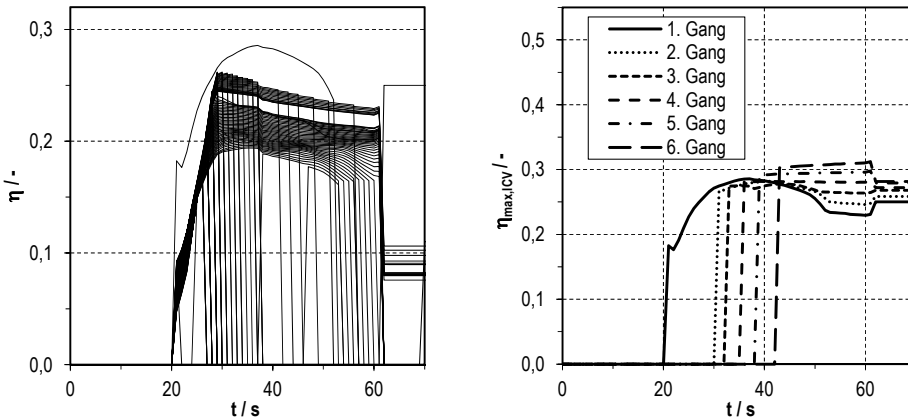
höchsten. Ab diesem Zeitpunkt liegt das geforderte GTE-Moment oberhalb des maximalen EM-Drehmoments, so dass BE-Fahren keine Option mehr darstellt.

Der Vergleich der Zeitverläufe der Vektorelemente in **Bild 5-16** zeigt, dass mit geringer werdendem EM-Motormoment der Kraftstoffnutzungsgrad aufgrund des gleichzeitig mit größer werdendem VM-Drehmoment wachsenden VM-Wirkungsgrads steigt. Der Sprung im Kraftstoffnutzungsgrad – erkennbar an dem hellen Bereich in der Abbildung im Zeitintervall 28 s bis 60 s bei einem Kraftstoffnutzungsgrad von 0,22 bis 0,25 – ist auf den Wechsel des EM-Betriebszustands vom Motor- in den Generatorbetrieb zurückzuführen. Im Generatorbetrieb steigt der Kraftstoffnutzungsgrad mit – dem Betrag nach – steigendem EM-Generatordrehmoment weiter leicht an. Erkennbar ist auch, dass Vektorelemente mit geringerem Kraftstoffnutzungsgrad als optionale Betriebspunkte deutlich früher und damit bereits bei geringerer Drehzahl ausscheiden. Diese Vektorelemente gehören zu hohen EM-Drehmomenten, die entsprechend der EM-Motorkennung (siehe Bild 3-10, S. 37) mit steigender Drehzahl nicht mehr realisierbar sind.

Bild 5-16: Verläufe der Kraftstoffnutzungsgrade für PAH während der ersten Beschleunigungsphase im Fahrzyklus EUDC.

Links: im ersten Gang für alle Elemente des Optionsvektors.

Rechts: Verläufe der maximale Wirkungsgrade für alle Gangstufen.



Im rechten Teil von **Bild 5-16** sind die $z = 6$ maximalen Kraftstoffnutzungsgrade dargestellt. Der Kraftstoffnutzungsgrad im ersten Gang ist hier am höchsten bis zum Zeitpunkt $t = 36$ s.

5.7.6 Optionale elektrische Leistungen des Brennstoffzellensystems

Maßgeblich für die optimierte Ansteuerung des Brennstoffzellensystems (BZS) ist analog zum Vorgehen bei PAH die Leistungsbilanz der Batterie, die sich in diesem Fall wie folgt darstellt:

$$P_{Batt}^{e,opt} = P_{EM}^e + P_{NV}^e - P_{BZS}^{e,opt} \quad (5-34)$$

$P_{Batt}^{e,opt}$	optionale, elektrische Leistungen der Batterie, resultierender Optionsvektor aus $P_{BZ}^{e,opt}$
P_{EM}^e	elektrische Leistung der Elektromaschine
P_{NV}^e	elektrische Leistung der Nebenverbraucher im Bordnetz
$P_{BZ}^{e,opt}$	optionale, elektrische Leistungen des Brennstoffzellensystems (Optionsvektor)

Die elektrische BZ-Leistung wird – bezogen auf die elektrische Batterieleistung – mit entgegengesetztem Vorzeichen geführt, da sie die Batterieleistung reduziert. Ist die BZ-Leistung dem Betrag nach größer als die Summe der Leistungen von Elektromaschine und Nebenverbrauchern, dann setzt Batterieladung ein.

Auch hier erfolgt eine Gültigkeitsprüfung optionaler Werte bezüglich der Einhaltung der Betriebsgrenzen der Batterie. Als Ergebnis wird der Gültigkeitsvektor $j_{Pe,BZ}^{opt}$ (siehe Unterabschnitt 5.7.1) bestimmt, der im anschließenden Schritt der energetischen Bewertung auf den Ergebnisvektor abgebildet wird.

5.7.7 Energetische Bewertung und Ansteuerung des BZ-Systems bei FCV

Die in Unterabschnitt 5.7.5 genannte Bilanzgleichung bildet den Ausgangspunkt der Wirkungsgradoptimierung, indem ähnlich zur Vorgehensweise bei PAH die Wirkungsketten der Stromnutzung unter Einbeziehung der nutzbaren Abwärme des Brennstoffzellensystems bewertet werden. Das Verfahren ist im Vergleich zu PAH einfacher, da hier nur optional im Hochspannungsnetz verfügbare Leistungen bewertet werden. Die Bewertungsfunktion ist damit im Falle Batterieladen ($P_{e,Batt} < 0$) und -entladen ($P_{e,Batt} > 0$):

$$\eta_{KS,FCV} = \frac{P_{EM}^e + P_{KB}^{th} + P_{BN,zg}^e + P_{zv}^e}{P_{BZS}^{ch}} \quad \text{für } P_{e,Batt} < 0 \quad (5-35)$$

$$\eta_{KS,FCV} = \frac{P_{EM}^e + P_{KB}^{th} + P_{BN,zg}^e}{P_{BZS}^{ch} + \frac{P_{Batt,etl}^e}{\eta_{SBS}}} \quad \text{für } P_{e,Batt} > 0 \quad (5-36)$$

$\eta_{KS,FCV}$	Wirkungsgrad der Bereitstellung mechanischer, thermischer und elektrischer Leistung bezogen auf den Kraftstoffumsatz für FCV (Kraftstoffnutzungsgrad)
P_{EM}^e	elektrische Leistung der Elektromaschine
P_{KB}^{th}	in der Kabine verfügbare Heizleistung, nur im Bedarfsfall
$P_{BN,zg}^e$	elektrische Leistung zur zeitgleichen Verwendung im Bordnetz
P_{zv}^e	elektrische Leistung zur zeitversetzten Nutzung in Bordnetz und Antrieb
P_{BZS}^{ch}	chemische Leistung des im Brennstoffzellensystem umgesetzten Wasserstoffs
$P_{Batt,etl}^e$	Entladeleistung der Batterie
η_{SBS}	Wirkungsgrad des beim Entladen bereitgestellten Stroms

Die im Bedarfsfall in der Kabine verfügbare Heizleistung ist:

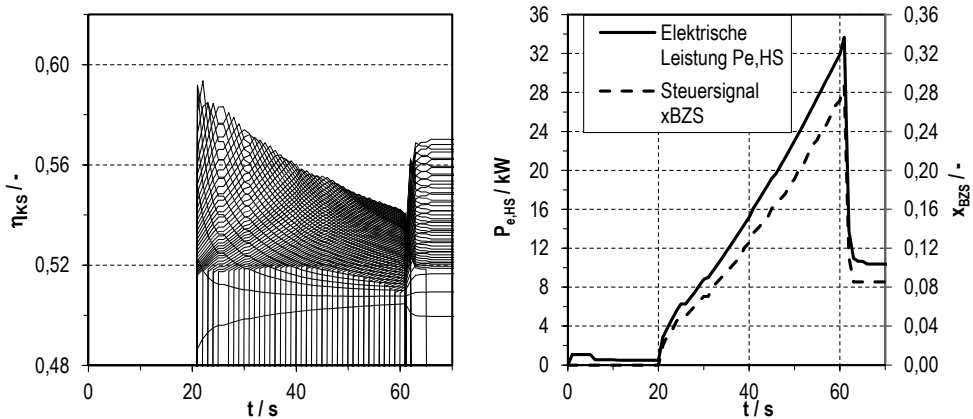
$$P_{KB}^{th} = P_{EM,KB}^{th} + P_{FCS,KB}^{th} \quad (5-37)$$

Die Wirkungsgradkette zur Bewertung der beim Batterieladen gespeicherten Energie verkürzt sich im Vergleich zu PAH zu:

$$\eta_{zv} = \eta_{GW} \cdot \eta_{Batt,ldn} \cdot \eta_{Batt,etl} \cdot \eta_{GW} \quad (4-6)$$

In **Bild 5-17** sind in der linken Abbildung die Zeitverläufe der Kraftstoffnutzungsgrade bei der Bereitstellung der Bordnetzleistung zu sehen. Die daraus resultierende Ansteuerung des Brennstoffzellensystems (BZS) zeigt das Diagramm rechts. Eine Sollwertausgabe erfolgt erstmals zum Zeitpunkt $t = 21\text{s}$. Erst dann stellt der Betrieb des BZS die, im Vergleich zur Entnahme elektrischer Leistung aus der Batterie, günstigere Option der Stromversorgung dar. Die elektrische Leistung im Hochspannungsnetz steigt dabei von 500 W auf $2,9\text{ kW}$.

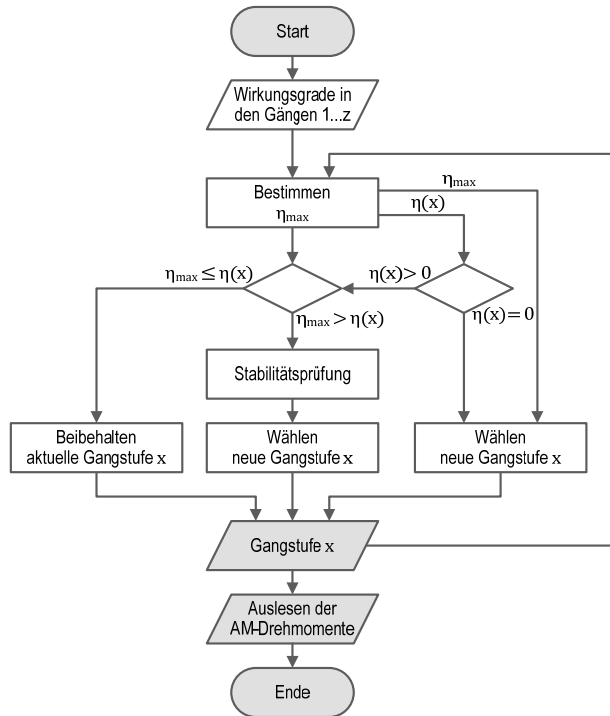
Bild 5-17: Verläufe optionaler Kraftstoffnutzungsgrade (links) und Ansteuerung des Brennstoffzellensystems (rechts) bei FCV während der ersten Beschleunigungsphase des Fahrzyklus EUDC.



5.7.8 Wahl der Gangstufen und Sollwerte der Antriebsmaschinen

Mit der im vorangegangenen Unterabschnitt beschriebenen Ermittlung der Kraftstoffnutzungsgrade stehen nun die zur Wahl der optimalen Gangstufe notwendigen Daten zur Verfügung. Die unmittelbare Selektion der Gangstufe mit dem höchsten Kraftstoffnutzungsgrad kann jedoch in Betriebsbereichen mit nahe beieinanderliegenden maximalen Wirkungsgraden zu schnell aufeinanderfolgenden Schaltvorgängen führen. In Stiegeler (2008) [114, S. 68ff.] wurden statische und dynamische Verfahren vorgestellt, deren Anwendung solche ungewollten Gangwechsel vermeidet. Im statischen Fall wird ein Schaltvorgang nur dann ausgeführt, wenn eine definierte Wirkungsgraddifferenz, um die der neue Gang günstiger sein muss, als der aktuell gewählte Gang, überschritten wird. Bleibt bei längerem stationärem Betrieb eine Gangstufe mit geringfügig schlechterem Wirkungsgrad aktiv, entsteht ein im Zeitverlauf steigender Verbrauchsnachteil [114].

Bild 5-18: Programmablaufplan der Getriebesteuerung.



Dynamische Verfahren sind daher grundsätzlich vorzuziehen. Das in [114, S. 70f.] entwickelte dynamische Verfahren nutzt eine dynamisch ermittelte Schaltschwelle als Entscheidungskriterium für den Gangwechsel. Dabei wird neben der Verweildauer je Gangstufe auch die Schalttiefe, also das mögliche Überspringen von Gängen einbezogen. Voraussetzung für die Implementierung des Verfahrens ist allerdings die Analyse der Vorteile unter Anwendung einer Kostenfunktion anhand unterschiedlicher Fahrzyklen [114]. Damit entsteht eine starke Abhängigkeit der Getriebesteuerung von den spezifischen technischen Eigenschaften des Pkw-Konzepts, die für die vorliegende Arbeit von Nachteil ist. Aus diesem Grund wird hier ein vereinfachter dynamischer Ansatz gewählt, mit dessen Hilfe Schaltvorgänge unter Nutzung einer zeitbasierten Stabilitätsprüfung gesteuert werden. **Bild 5-18** verdeutlicht die Vorgehensweise anhand des Programmablaufplans. Demnach muss der Wirkungsgradvorteil einer Gangstufe über eine mit $t_{GT,vwd}$ festgelegte Mindestverweildauer erhalten bleiben, bevor diese günstigere Gangstufe gewählt wird. Stellt eine Gangstufe durch Verlassen des Betriebsbereichs der Antriebsmaschinen keine Option mehr dar, wird aus den verbleibenden Optionen ohne Zeitverzug die Gangstufe mit dem höchsten Wirkungsgrad gewählt.

Nach erfolgter Gangstufenwahl werden die zugehörigen Sollwerte der AM-Drehmomente ausgelesen und an das Antriebsstrangmodell übergeben.

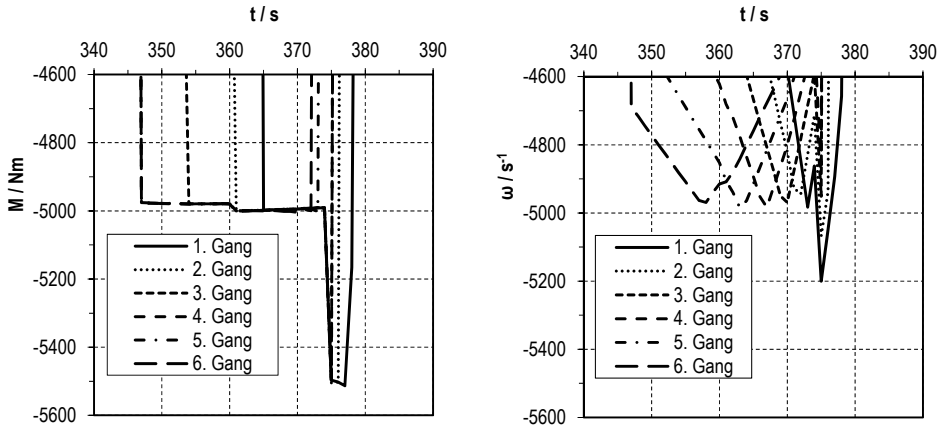
5.7.9 Rekuperatives Bremsen

Zur Steuerung des rekuperativen Bremsens (RKB) wird in ähnlicher Weise vorgegangen, wie bei der Optimierung des Kraftstoffnutzungsgrads. Ausgangsbasis sind die optionalen GTE-Drehzahlen und -Drehmomente (siehe Unterabschnitt 5.7.3). Nach Begrenzung durch das maximale Generatormoment (siehe Unterabschnitt 5.5.2) wird aus Drehzahl und Drehmoment an der Elektromaschine mithilfe des Wirkungsgradkennfelds die verfügbare elektrische Leistung ermittelt. Diese dient als Eingangsgröße zur Wahl der Gangstufe beziehungsweise des zugehörigen Maschinenmoments. Dieses Verfahren ist ähnlich dem laut Bild 5-18; allerdings wird hier nicht der Wirkungsgrad sondern die maximale elektrische Leistungsaufnahme des Generators als Schaltkriterium verwendet.

Bild 5-19: Verlauf der Generatorleistung während des rekuperativen Bremsens im EUDC.

Links: analytisch ermittelter Verlauf

Rechts: mit Abschlagsfaktor f_{RKB} modifizierter Verlauf.



Eine Stabilisierung der Getriebesteuerung ist beim RKB von besonderer Bedeutung, da die als Generator betriebene EM auch bei unterschiedlichen Drehzahlen sehr ähnliche maximale Leistungen aufweisen kann. **Bild 5-19** zeigt dazu im linken Diagramm den Zeitverlauf der je Gangstufe realisierbaren Generatorleistungen während der zweiten Verzögerungsphase im EUDC. Es ist erkennbar, dass die Leistungsverläufe sehr dicht beieinander liegen, was zu häufigen Schaltvorgängen führt. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit eine Gewichtungsfunktion bezüglich der elektrischen Generatorleistung eingeführt. Bei einer rekuperierbaren Leistung oberhalb von 80 % der maximalen Leistung wird ein Abschlagsfaktor f_{RKB} eingeführt, der – ausschließlich zur Bewertung – elektrische Generatorleistungen bei zunehmender Abweichung der Drehzahl von der mittleren Drehzahl abwertet:

$$f_{RKB}|_x = 1 - \left(\frac{|\omega_{EM}|_x - \bar{\omega}_{EM}|}{\bar{\omega}_{EM}} \cdot \left(\frac{P_{EM}^e|_x}{P_{EM,min}^e} - 0,8 \right) \right) \quad \text{mit } P_{EM}^e|_x < 0 \quad (5-38)$$

f_{RKB} Abschlagsfaktor

$\omega_{EM} _x$	Maschinendrehzahl in der Gangstufe x
$\bar{\omega}_{EM}$	Mittelwert des Maschinendrehzahlbereichs
$P_{EM}^e _x$	elektrische Generatorleistung in Gangstufe x
$P_{EM,min}^e$	maximale elektrische Generatorleistung („min“ da negative Werte)

Im rechten Diagramm von **Bild 5-19** ist der Zeitverlauf der so bewerteten Generatorleistungen zu sehen. Die Verläufe sind deutlich differenzierter und bilden damit eine geeignete Grundlage für die Getriebesteuerung.

5.8 Umsetzung der Gesamtfahrzeugmodelle

Die im vorangegangenen Abschnitt erläuterten Komponentenmodelle und Vorgehensweisen zur Bestimmung der Steuerungsparameter sollen nun zum Abschluss des Kapitels 5 im Zusammenhang mit den konzeptspezifischen Simulationsabläufen dargestellt werden. Dazu wurden für jedes Konzept Programmablaufpläne entwickelt, deren Vergleich deutlich werden lässt, welche Gemeinsamkeiten im Sinne des einheitlichen Modellansatzes (siehe Abschnitt 2.3) bestehen, und welche verbrauchsrelevanten Unterschiede aus den spezifischen Eigenschaften der Antriebstopologien resultieren. Für alle Pkw-Konzepte bildet die Sollgeschwindigkeit laut den Fahrzyklen die Haupteingangsgröße. Ergänzend kommen Bordnetzleistungen des 14 V-Bordnetzes hinzu, die jedoch teilweise auch aus dem Betriebsfahrzustandsabhängiger Verbraucher resultieren. Zu diesen gehören unter anderem die Motorstartanlage bei ICV und PAH oder das Bremslicht bei Bremsvorgängen. Schließlich bildet die thermische beziehungsweise elektrische Leistung der Kabinenklimatisierung eine Eingangsgröße für alle Konzepte. Diese Leistungsbedarfe sind über die Abhängigkeit des Wärmeübergangskoeffizienten der Karosserie ebenfalls fahrzustandsabhängige Größen (siehe Abschnitt 3.6).

Ergebnisgrößen sind der Kraftstoffverbrauch bei ICV, PAH und FCV und die Ladungsbilanz beziehungsweise der Ladezustand (SOC) der Batterie bei allen Konzepten. Für detailliertere Analysen werden weitere Daten dokumentiert (siehe Anhang I). Das Vorgehen zur Minimierung der Ladezustandsänderung zwischen Beginn und Ende von Simulationsdurchläufen wurde bereits im Abschnitt 5.3 erläutert.

Wie die Darstellungen in Bild 5-20 bis Bild 5-23 deutlich machen, ergeben sich unterschiedliche Berechnungspfade zur Bestimmung der Sollwerte für Antriebsmaschinen und Gangstufe sowie des Bremsmoments. Entscheidungskriterium ist die Richtung des erforderlichen Antriebsmoments, welches ausgehend von der Fahrsituation am Reglerausgang zur Verfügung steht.

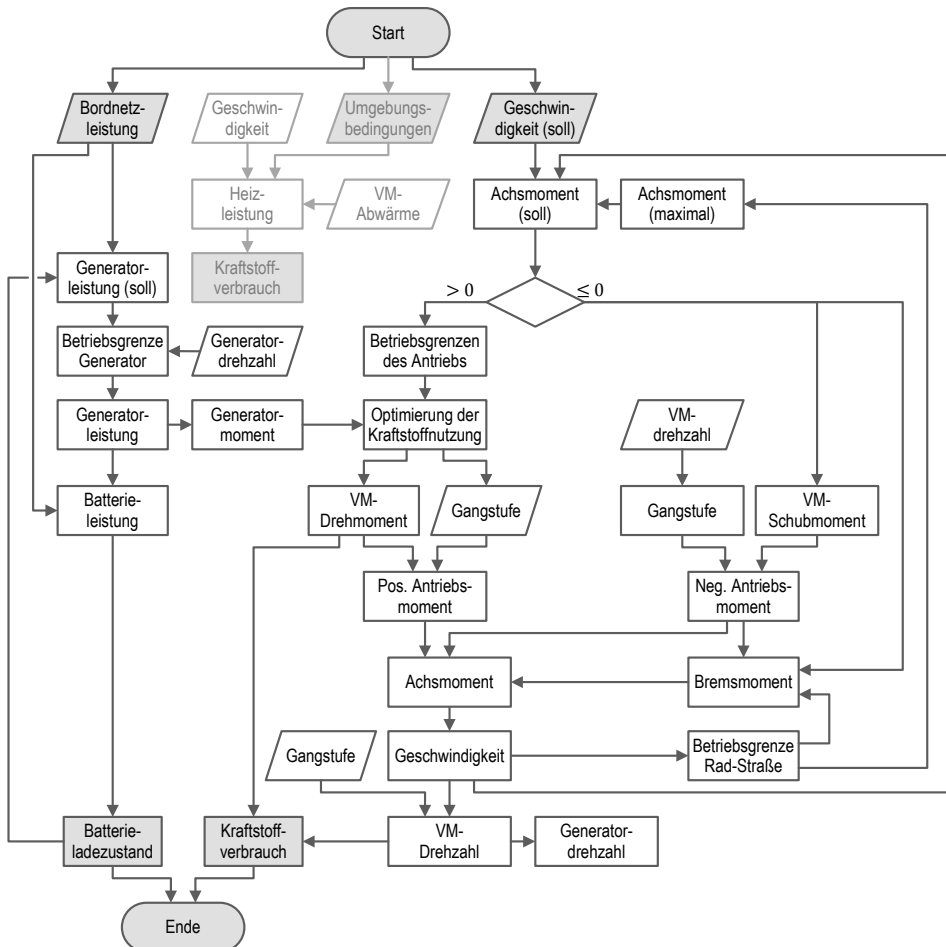
Wie zuvor bereits erwähnt, ist die Bestimmung der Geschwindigkeit, ausgehend von den Drehmomenten der Antriebsmaschinen sowie der gewählten Gangstufe für alle Konzepte einheitlich. Die nachfolgenden Erläuterungen beschreiben in kurzer Form die Programmabläufe der erstellten Modelle für ICV, PAH, BEV und FCV.

5.8.1 Verbrennungsmotor-Pkw – ICV

Der Programmablauf des ICV-Modells weist, zusammen mit dem des BEV, die geringste Komplexität auf. Bezüglich der Optimierung besteht nur der Freiheitsgrad der Gangstufewahl, wobei die Zahl der sich überschneidenden Gangstufen von der Fahrsituation abhängt.

Bild 5-20: Programmablaufplan des ICV-Simulationsmodells.

pos.: positiv; **neg.:** negativ; **VM:** Verbrennungsmotor.



Im Sinne der im Unterabschnitt 4.1.1 definierten Betriebspunktverschiebung (BPV), kann durch Änderung der Gangstufe der Betriebspunkt des Verbrennungsmotors (VM) verschoben und so der Kraftstoffverbrauch optimiert werden. Der elektrische Speicher wird mithilfe einer SOC-Steuerung im vorgegebenen SOC-Bereich betrieben, wobei das Generatormoment als zusätzliches VM-Lastmoment die Stellgröße ist. Den Programmablaufplan zeigt **Bild 5-20**.

Das ebenfalls in das Simulationsmodell integrierte thermische Kabinenmodell ist in diesem Bild schattiert dargestellt, da die Kabinenklimatechnik im Falle des ICV nicht in gleicher Weise wie bei den anderen Konzepten einbezogen werden kann: aufgrund der unzureichenden Leistungsfähigkeit des Bordnetzes können elektrisch betriebene Heizungen und Klimakompressoren nicht eingesetzt werden. Unter Anwendung des Kabinenmodells und der verfügbaren Motorabwärme wird jedoch die zusätzlich benötigte Heizwärme ermittelt. Unter Annahme eines Brennstoffheizers, der die erzeugte Wärme vollständig an den Innenraum abgeben kann, ist auf diesem Wege eine Abschätzung des Mehrverbrauchs möglich.

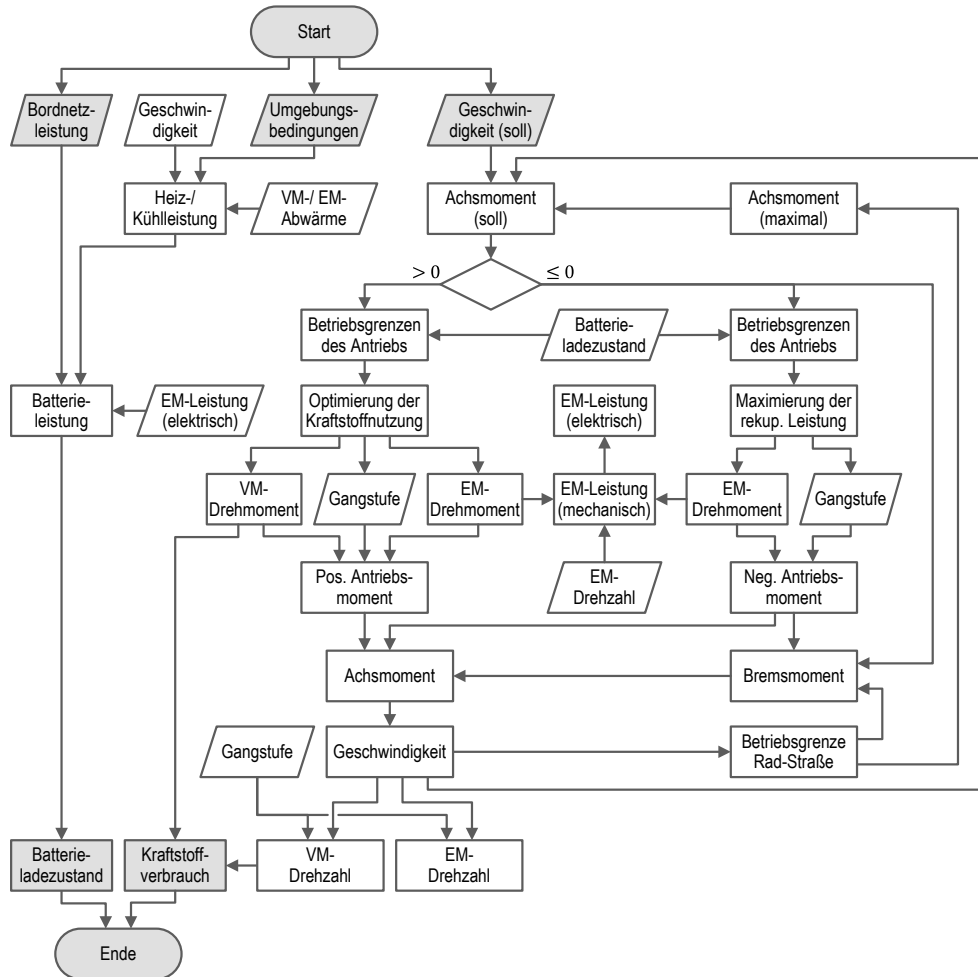
5.8.2 Parallelhybrid-Pkw – PAH

Kennzeichnend für den Simulationsablauf des PAH-Modells ist die deutlich größere Zahl der im Optimierungsverfahren parallel zu bewertenden Optionen (siehe Unterabschnitt 5.7.5). Das Leistungsmanagement ist im Vergleich zu ICV und BEV deutlich komplexer, da die Betriebsweise der Elektromaschine die Hybridfunktionalitäten laut Tab. 4-1 (S. 57) unter Anwendung des im Abschnitt 5.7 erläuterten Optimierungsverfahrens steuert. Zusätzlich erfolgt eine Maximierung der rekuperierten Bremsenergie laut dem in Unterabschnitt 5.7.9 erläuterten Verfahren. Der Programmablaufplan des PAH-Simulationsmodells ist in **Bild 5-21** dargestellt.

Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind die nutzbaren Wärmeleistungen von Verbrennungsmotor und Elektromaschine lediglich als Datenquelle dargestellt. Die Berechnung erfolgt unter Berücksichtigung des Wärmeübergangs, wie im Abschnitt 5.6 beschrieben.

Bild 5-21: Programmablaufplan des PAH-Simulationsmodells.

pos.: positiv; neg.: negativ; EM: Elektromaschine; VM: Verbrennungsmotor.



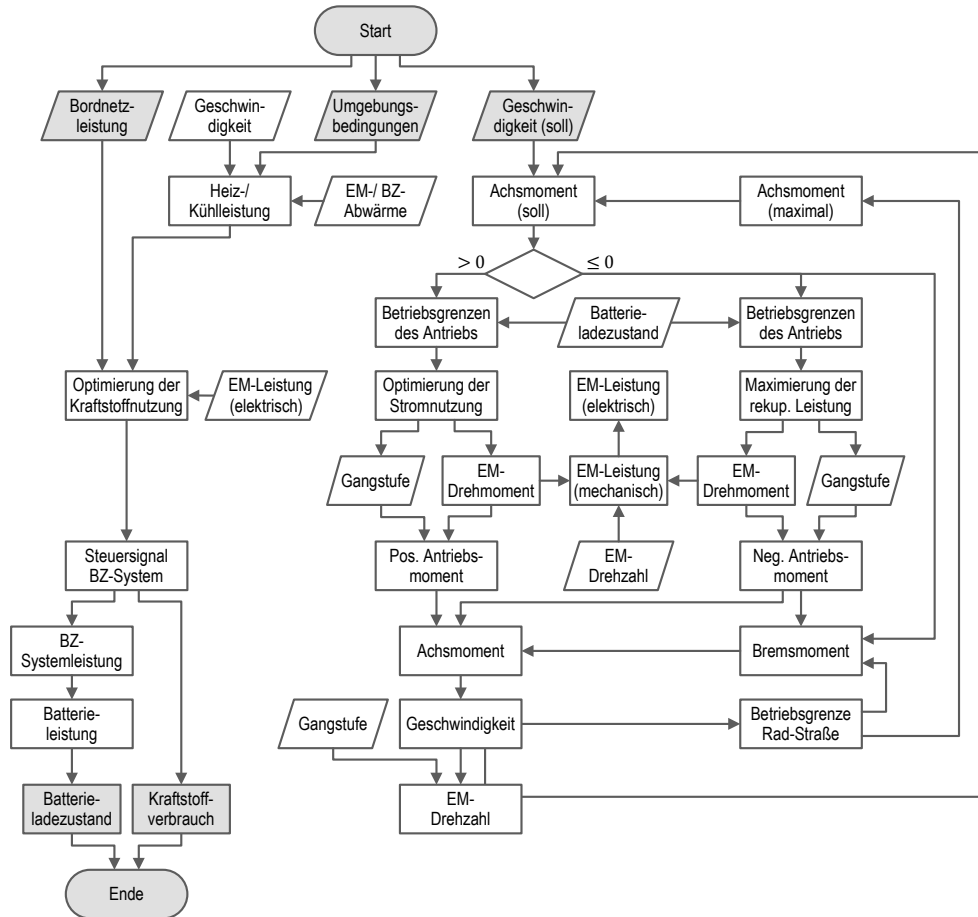
5.8.3 Batterie-Pkw – BEV

Analog zum Programmablauf des ICV besteht bei BEV nur in der Wahl der Gangstufe die Möglichkeit der Optimierung der Kraftstoffnutzung, siehe **Bild 5-22**.

Die Verfügbarkeit des Hochspannungsbordnetzes erlaubt den Betrieb von elektrisch betriebenen Heizungen und Klimakompressoren. An dieser Stelle sei noch einmal erwähnt, dass Fahrzyklussimulationen zur Verbrauchsbestimmung bei BEV so oft durchgeführt werden, bis die Entladeschlussspannung als Abbruchkriterium erreicht ist, wobei davon ausgehend nur die vollständig durchlaufenen Fahrzyklen bewertet werden.

Bild 5-23: Programmablaufplan des FCV-Simulationsmodells.

pos.: positiv; neg.: negativ; BZ: Brennstoffzelle; EM: Elektromaschine.



5.9 Fazit

In Kapitel 5 wurde die Umsetzung der in Kapitel 3 spezifizierten Komponentenmodelle und Lastprofile sowie der in Kapitel 4 definierten Optimierungsfunktionen in eine Modellumgebung erläutert. Diese umfasst neben den erstellten dynamischen Modellen alle Parameterdefinitionen und Berechnungsabläufe im Vorfeld der Simulationen, die zur Realisierung der geforderten Einheitlichkeit der vergleichenden Verbrauchsanalyse notwendig sind.

Der Schwerpunkt des Kapitels lag in der Entwicklung einer verbrauchsoptimierenden Laststeuerung. Im hier gewählten Ansatz werden optionale Betriebszustände von Antriebskomponenten in paralleler Rechnung analysiert und anschließend bezüglich des Gesamtsystems

energetisch bewertet. Diese energetische Bewertung schließt gemäß der Aufgabenstellung auch die in Kapitel 3 definierten thermischen und elektrischen Lastprofile sowie die Restwärme von Systemkomponenten (siehe Abschnitt 5.6) ein. Im einfachen Fall – bei Verbrennungsmotor-Pkw (ICV) und Elektro-Pkw mit Batterie (BEV) – ist die Gangstufenzahl gleich der Zahl der zu bewertenden Optionen. Im Falle der hybridisierten Antriebskonzepte Parallelhybrid mit Verbrennungsmotor (PAH) und Elektro-Pkw mit Brennstoffzellen (FCV) bestehen deutlich größere Bewertungsumfänge. Hier wurden die kontinuierlich-variablen Steuergrößen Drehmoment bei PAH und Brennstoffzellensystemleistung bei FCV in diskrete Werte zur Abdeckung der Betriebsbereiche überführt.

Abschließend zu Kapitel 5 wurden mithilfe von Programmablaufplänen die konzeptspezifischen Berechnungsabläufe dargestellt.

6 Bestimmung des Verbrauchsreduktionspotentials

In den vorangegangenen Kapiteln wurden die Leistungsbilanzen der vier untersuchten Pkw-Konzepte spezifiziert, die Umsetzungen dieser Konzepte in dynamische Simulationsmodelle, einschließlich der Entwicklung optimierender Betriebsstrategien erläutert und die Berechnungsabläufe beschrieben. In diesem Kapitel werden nun die Ergebnisse aus den Simulationsrechnungen dargestellt und bewertet. Einführend werden die Untersuchungsmatrix der Konzepte und Lastfälle sowie zwei Berechnungsszenarien, auf die die Untersuchungsmatrix jeweils angewandt wird, definiert. Mithilfe der Berechnungsszenarien werden mögliche Entwicklungsfortschritte bei Komponententechnologien sowie Maßnahmen zur Reduktion der Fahrwiderstände berücksichtigt.

6.1 Definition von Untersuchungsmatrix und Berechnungsszenarien

Mit den Festlegungen im Abschnitt 3.4 stehen insgesamt 25 Fahrzyklen zur Verfügung, die als Grundlage der Kraftstoffverbrauchsanalyse maßgeblich für den zeitabhängigen, mechanischen Leistungsbedarf sind. In den Abschnitten 3.5 und 3.6 wurden die elektrischen Leistungsbedarfe des 14 V-Bordnetzes und der Kabinenklimatisierung bestimmt. Unter Zusammenführung der Klimatisierungsfälle (siehe Tab. 3-7, S. 29) und des hier definierten Basislastfalls „Nur Grundlast“ werden die in **Tab. 6-1** aufgeführten Bordnetzlastfälle für die Analyse festgelegt.

Tab. 6-1: Definition der Bordnetzlastfälle.

Definition der Klimatisierungsfälle KKL, SOT und FRT siehe Tabelle Tab. 3-7; **GRL:** „Nur Grundlast“, **KKL:** „Keine Klimatisierung“; **SOT:** „Sommertag“; **FRT:** „Frosttag“; **HE:** Heizelement; **KL:** Klimakompressor.

Bezeichnung	Grundlast im 14 V-Bordnetz (siehe Tab. 3-6)	Weitere 14 V- Bordnetzverbraucher (siehe Tab. 3-6)	Einrichtungen zur Klimatisierung
GRL: „Nur Grundlast“	■	□	□
KKL: „Keine Klimatisierung“	■	■	□
SOT: „Sommertag“	■	■	■ (KL)
FRT: „Frosttag“	■	■	■ (HE)

Im Bordnetzlastfall GRL wird nur eine konstante Grundlast angenommen, die sich aus dem Betrieb von Steuergeräten und Kühlmittelpumpen laut Tab. 3-6 ergibt. Der Bedarf an elektrischer Energie steigt in der Reihenfolge der in der Tabelle aufgeführten Bordnetzlastfälle.

Unter Zusammenführung der analysierten Fahrzeugkonzepte und der Bordnetzlastfälle laut **Tab. 6-1** wird die hier verwendeten Untersuchungsmatrix, die in **Tab. 6-2** dargestellt ist, festgelegt.

Tab. 6-2: Untersuchungsmatrix zur Analyse des Kraftstoffverbrauchs der betrachteten Pkw-Konzepte.

Definition der Bordnetzlastfälle GRL, KKL, FRT und SOT siehe Tab. 6-1; **ICV**: Pkw mit Verbrennungsmotor; **PAH**: Parallelhybrid; **BEV**: Elektro-Pkw mit Batterie; **FCV**: Elektro-Pkw mit Brennstoffzellen; **G**: Benzin; **D**: Diesel; Spezifikationen bezüglich der Pkw-Segmente, siehe Tabelle Tab. 3-2, S. 16.

Pkw-Topologie Pkw-Segment		„Nur Grundlast“ (GRL)	„Keine Klimatisierung“ (KKL)	„Frosttag“ (FRT)	„Sommertag“ (SOT)
ICV – G / ICV – D	A-Segment	■	■	▣	□
ICV – G / ICV – D	C-Segment	■	■	▣	□
PAH – G / PAH – D	A-Segment	■	■	■	■
PAH – G / PAH – D	C-Segment	■	■	■	■
BEV	A-Segment	■	■	■	■
BEV	C-Segment	■	■	■	■
FCV	A-Segment	■	■	■	■
FCV	C-Segment	■	■	■	■

Legende: ■ Analysefall; ▣ Analysefall mit eingeschränkter Gültigkeit; □ kein Analysefall

Für jedes Pkw-Konzept werden dementsprechend je Lastfall – entsprechend der Anzahl der verwendeten Fahrzyklen – 25 Verbrauchsbestimmungen durchgeführt, wobei jeder Fahrzyklus zum Ausgleich des Batterieladezustandes mehrfach durchfahren wird (siehe Abschnitt 5.3). Für Verbrennungsmotor-Pkw (ICV) wird der Lastfall SOT nicht betrachtet, da bei diesem Konzept die Kabinenklimatisierung aufgrund der zu geringen Leistungsfähigkeit des Bordnetzes nicht in analoger Weise zum Parallelhybrid (PAH), Batterie-Pkw (BEV) und Brennstoffzellen-Pkw (FCV) erfolgen kann. Zur Bewertung der Stromerzeugung bei ICV werden deshalb die Verbrauchsbestimmungen im Lastfall GRL und im Falle ohne Klimatisierung (KKL) herangezogen. Für den Fall „Frosttag“ (FRT) gilt als Einschränkung, dass die thermische Residuallast als zusätzlicher Kraftstoffverbrauch zur Wärmebereitstellung angenommen wird und dieser Fall deshalb keinen Bordnetzlastfall darstellt. Insgesamt resultieren aus diesen Festlegungen 300 Verbrauchsbestimmungen für ICV, 400 für PAH sowie je 200 für BEV und FCV.

Die Untersuchungsmatrix laut **Tab. 6-2** wird, wie eingangs dieses Kapitels erwähnt, auf die zwei an dieser Stelle definierten Szenarien „Standard“ und „Zukunft“ angewandt, mit deren Hilfe mögliche Entwicklungsfortschritte bei Komponententechnologien sowie Maßnahmen zur Senkung der Fahrwiderstände berücksichtigt werden. Das Verhältnis der Kraftstoffverbrauchs Differenz zum Verbrauch im Szenario „Standard“ wird in dieser Arbeit als Verbrauchsreduktionspotential definiert. Einzelheiten zu den Szenarien können **Tab. 6-3** entnommen werden.

Tab. 6-3: Annahmen für die Szenarien „Standard“ und „Zukunft“.

N.A.: nicht anwendbar; BZ: Brennstoffzelle; PV: Photovoltaik; TEG: thermoelektrischer Generator.

Parameter	Einheit	„Standard“	„Zukunft“
Luftwiderstandsbeiwert	–	0,32	0,27 [126]
Rollwiderstandsbeiwert	–	angepasst nach [127], siehe Bild 6-1	
Masse des Basisfahrzeugs, A- C-Segment	kg	800 1000 (–10%)	720 900 (–10%)
Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors	–	verbessertes Kennfeld, siehe Unterabschnitt 3.7.1	
Wirkungsgrad der Elektromaschine	–	verbessertes Kennfeld, siehe Unterabschnitt 3.7.2	
Wirkungsgrad der Brennstoffzelle	–	verbesserte u-i Kennlinie, siehe Unterabschnitt 3.8.2	
Spezifische Leistung des BZ-Systems	kW kg ^{–1}	0,400 [128]	0,650 [128]
Spezifische Energie des H ₂ -Tanks	Wh kg ^{–1}	1800	2160 (+20 %)
Spezifische Energie der Batterie	Wh kg ^{–1}	100	150 (+50 %)
Heiz-/Kühlleistung	–	um 20% reduzierter Wärme-/ Kältebedarf	
Stromerzeugung mit TEG und PV-Modulen, A- C-Segment (s. Unterabschnitte 3.8.4 u. 3.8.5)	W	N.A.	ICV, PAH: 380 500 BEV, FCV: 180 300

Bezüglich des Luftwiderstandsbeiwertes wurde mit 0,27 eine Angabe bezüglich verbesserter Serienfahrzeuge [126, 127] übernommen, die deutlich unter Werten für Pkw des heutigen Massenmarktes liegen. Die geschwindigkeitsabhängige Bestimmung des Rollwiderstandsbeiwerts wurde so angepasst, dass die Fahrwiderstandskurve für stationäre Geschwindigkeiten mit Angaben laut [127] übereinstimmt (siehe **Bild 6-1**).

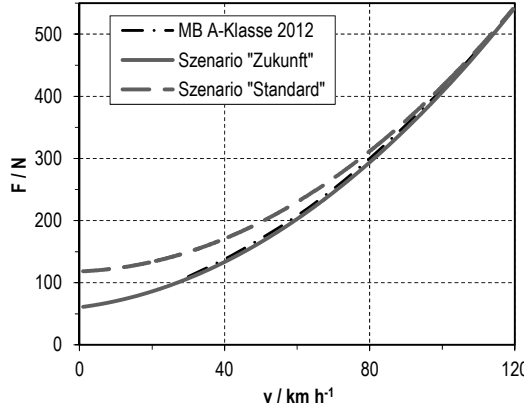
Bei Brennstoffzellensystemen sind Angaben zur spezifischen Leistung auf Grundlage des in [128] dokumentierten Stands der Technik, bezogen auf das Jahr 2011, sowie für den Zielwert 2017 bis 2020 verwendet worden. Darüber hinaus gelten – in Bezug auf alle untersuchten Konzepte – für weitere Verbesserungen pauschale Annahmen bezüglich erhöhter spezifischer Leistungen und Energien von Antriebskomponenten sowie optimierter Kennlinien und Kennfelder entsprechend **Tab. 6-3**.

Berechnungsergebnisse werden nachfolgend zusammenfassend als Mittelwerte einschließlich der Standardabweichungen aus den Einzeldaten innerhalb der Fahrzyklengruppen „Städtisch“, „Überland“, „Autobahn“ und „Kombiniert“ angegeben. Die Standardabweichung wird in dieser Arbeit als Maß für die Streuung der fahrzyklusspezifischen Verbrauchswerte um deren Mittelwert genutzt. Für die Diskussion dieser Angaben oder einzelner Verbrauchsbestimmungen werden

- energetische Nutzungsgrade η_E (Gl. 6-1),
- differentielle Wirkungsgrade sowie
- Variationskoeffizienten der Verbrauchswerte je Fahrzyklengruppe als Quotient aus Standardabweichungen und Mittelwert genutzt.

Bild 6-1: Anpassung der Fahrwiderstandskurve für das Szenario „Zukunft“.

Anpassung durch veränderte Koeffizienten der Rollwiderstandsgleichung (Gl. 3-7, S. 17) an Werte in [127] auf Basis der dort angegebenen Fahrzeugparameter: $c_W = 0,27$; $A_Q = 2,2 \text{ m}^2$; $m_F = 1370 \text{ kg}$; Werte unterhalb von 30 km h^{-1} mithilfe der Funktion des Rollwiderstands extrapoliert. MB: Mercedes-Benz.



Der energetische Nutzungsgrad wird in dieser Arbeit als konzeptübergreifende Vergleichsgröße gewählt und wie folgt definiert:

$$\eta_E = \frac{E_{Rad,pos}^m + E_{AC} + E_{14V,i}^e - E_{14V,GRL}^e}{E_{KS} + E_{Rad,neg}^m} \quad (6-1)$$

$E_{Rad,pos}^m$	mechanische Energie am Rad für positive Zugkräfte
E_{AC}	gesamte zur Kabinenklimatisierung aufgewendete Energie
$E_{14V,i}^e$	elektrische Energie des 14 V-Bordnetzes im Lastfall i
$E_{14V,GRL}^e$	elektrische Energie des 14 V-Bordnetzes im Lastfall „Nur Grundlast“ (GRL)
E_{KS}	Energie des verbrauchten Kraftstoffs
$E_{Rad,neg}^m$	mechanische Energie am Rad für negative Zugkräfte

Die Korrektur der elektrischen Energie des 14 V-Bordnetzes um den Grundlastbetrag berücksichtigt, dass die Grundlast nicht als Nutzenergie aufgefasst wird, da sie zum Betrieb des Antriebssystems erforderlich ist.

Differentielle Wirkungsgrade werden laut Gleichung 2-2 errechnet, die an dieser Stelle wiederholt wird:

$$\bar{\eta}_{diff}^e = \frac{\Delta E_{BN}^e}{\Delta E_{KS}} = \frac{E_{BN,i}^e - E_{BN,GRL}^e}{E_{KS,i} - E_{KS,GRL}} \quad \text{mit } i \in \{KKL, SOT, FRT\} \quad (2-2)$$

$E_{BN,i}^e$	Im Bordnetz umgesetzte elektrischen Energie im Lastfall i
$E_{KS,i}$	Energie des verbrauchten Kraftstoffs im Lastfall i

Diese Gleichung bezieht sich stets auf den Lastfall GRL. Für diesen Lastfall selbst kann daher kein differentieller Wirkungsgrad angegeben werden.

Bei der Berechnung der Variationskoeffizienten wird die Grundgesamtheit durch sämtliche Verbrauchswerte einer Fahrzyklengruppe und innerhalb dieser für alle Bordnetzlastfälle gebildet. Bei den für ICV geltenden drei möglichen Bordnetzlastfällen GRL, KKL und FRT bedeutet das beispielsweise für die Fahrzyklengruppe „Städtisch“ mit 10 Fahrzyklen eine Menge von 30 Werten.

Bild 6-2: Kraftstoffverbrauchswerte von ICV-G für den Bordnetzlastfall „Nur Grundlast“ im Szenario „Standard“.

Oben: A-Segment; **unten:** C-Segment.

Definition der Bordnetzlastfälle, siehe Tab. 6-1; Szenariendefinition, siehe Tab. 6-3.

ART.: ARTEMIS; **FreeUrb:** Free flow urban; **Highw:** Highway; **HYZ:** HYZEM; **MOD:** MODEM;

Mtrw130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); **Rur:** Rural; **SlowUrb:** Slow urban; **Urb:** Urban.

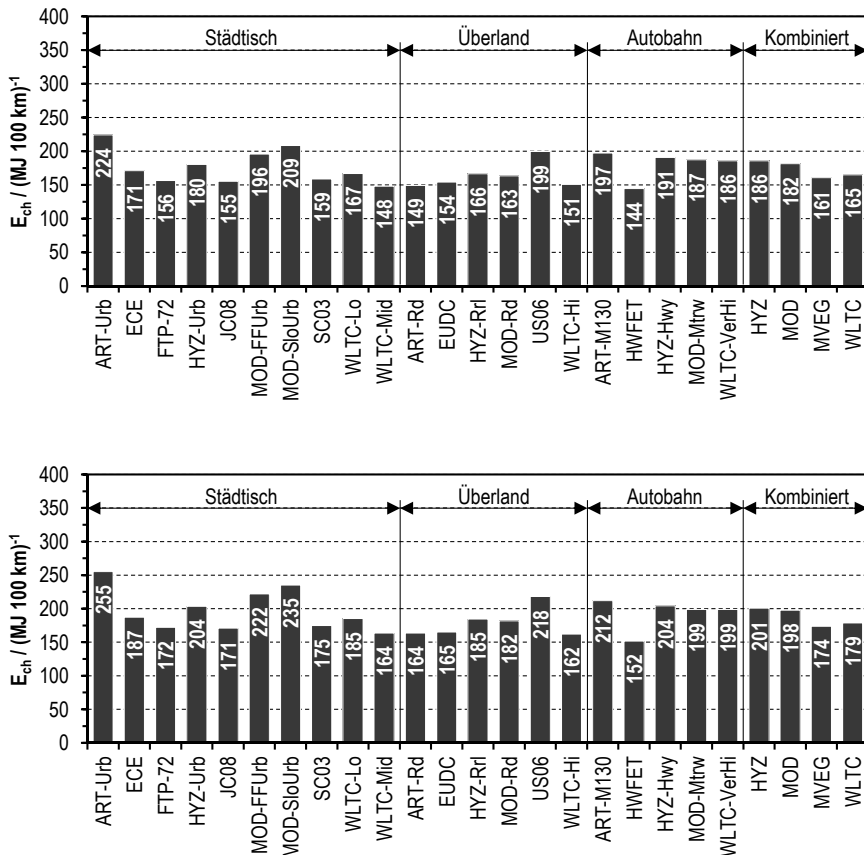


Bild 6-2 zeigt exemplarisch Kraftstoffverbrauchswerte für ICV des A- und C-Segments im Szenario „Standard“ für den Basislastfall GRL. Die angegebenen Werte werden in Unterabschnitt 6.2.1, wie erwähnt als Mittelwerte mit Standardabweichungen diskutiert. Die vollständige Darstellung der ermittelten Kraftstoffverbrauchswerte ist im Anhang K, ab S. 195 zu finden.

6.2 Ergebnisse und Diskussion

In Vorbereitung der Kraftstoffverbrauchsbestimmung wird für jedes Konzept die Leistungsklassifizierung der Antriebskomponenten unter Verwendung der fahrzeugklassenspezifischen Fahrzeugparameter und Fahrleistungsanforderungen durchgeführt. Das Vorgehen wurde im Abschnitt 5.4 beschrieben. Zusammenfassend dazu sind in **Tab. 6-4** die ermittelten Fahrzeugmassen sowie die mechanischen Nennleistungen der Antriebsmaschinen aufgelistet. Für ICV zeigt der Vergleich der Fahrzeugmassen eine gute Übereinstimmung zu heutigen Pkw des Massenmarkts, deren Mittelwert für das A-Segment bei 990 kg unter Einbeziehung von Fahrzeugen der Marken Opel (Agila) und Volkswagen (Fox und Up!) liegt. Wird auch der Smart (ForTwo) mit einer Fahrzeugmasse, die deutlich unter dem Mittelwert liegt, berücksichtigt, dann beträgt der Mittelwert 903 kg. Für das C-Segment ermittelte Fahrzeugmassen liegen etwa 50 kg unterhalb des Mittelwerts von Pkw der Marken Audi (A3), BMW (1er), Opel (Astra und Meriva), Volkswagen (Golf) und Mercedes Benz (A-Klasse). Ein Vergleich der Leistungen der Antriebsmaschinen ist schwierig, da Nennleistungen in hohem Maße spezifisch für konkrete Motorentwicklungen sind und entsprechende Angaben für unterschiedliche Betriebspunkte gelten können. Die hier ermittelten Werte sind im Vergleich zu den genannten Serien-Pkw im Mittel etwa 10 bis 20 kW_m größer.

Tab. 6-4: Fahrzeugmassen [kg] sowie Verbrennungs- und Elektromotorleistung [kW] der untersuchten Konzepten.

BEV: Elektro-Pkw mit Batterie; D: Diesel; FCV: Elektro-Pkw mit Brennstoffzellen; G: Benzin;

ICV: Verbrennungsmotor-Pkw; N.A.: nicht anwendbar; PAH: Parallelhybrid.

Pkw-Topologie	A-Segment						C-Segment					
	„Standard“			„Zukunft“			„Standard“			„Zukunft“		
	$m_F /$ kg	$P_{VM} /$ kW _m	$P_{EM} /$ kW _m	$m_F /$ kg	$P_{VM} /$ kW _m	$P_{EM} /$ kW _m	$m_F /$ kg	$P_{VM} /$ kW _m	$P_{EM} /$ kW _m	$m_F /$ kg	$P_{VM} /$ kW _m	$P_{EM} /$ kW _m
ICV-G	996	70	N.A.	889	65	N.A.	1251	93	N.A.	1117	86	N.A.
ICV-D	1044	63	N.A.	936	58	N.A.	1312	84	N.A.	1175	78	N.A.
PAH-G	1048	50	22	939	46	20	1319	67	29	1180	62	26
PAH-D	1098	46	20	984	42	18	1408	69	30	1248	60	26
BEV	1165	N.A.	74	976	N.A.	64	1416	N.A.	90	1193	N.A.	81
FCV	1235	N.A.	74	1013	N.A.	62	1603	N.A.	99	1297	N.A.	83

Werden die Fahrzeugmassen der Konzepte untereinander verglichen, wird deutlich, dass PAH je nach Fahrzeugklasse und Szenario ca. 50 kg schwerer im Vergleich zu ICV sind, was auf die leicht erhöhte Masse des Antriebsstrangs und die höhere Batteriemasse zurückzuführen ist. Batterie-Pkw weisen aufgrund der hohen Batteriemasse eine gegenüber Benzin-ICV um ca. 165 kg im Szenario „Standard“ und um ca. 80 kg im Szenario „Zukunft“ höhere Masse auf. Für FCV wurden im Szenario „Standard“ zusätzliche Massen von 240 kg im A-Segment und 353 kg im C-Segment ermittelt. Im Szenario „Zukunft“ beträgt die Mas-

sendifferenz 122 kg beziehungsweise 75 kg. Für die Konzepte PAH, BEV und FCV gelten aufgrund der gegenüber ICV erhöhten Fahrzeugmasse höhere mechanische Energien zum Durchfahren der Fahrzyklen.

6.2.1 Verbrennungsmotor-Pkw – ICV

Als Ergebnisse der Kraftstoffverbrauchsanalyse für ICV sind in **Bild 6-3** im linken Diagramm Werte für den Pkw des A-Segments im Szenario „Standard“ wiedergegeben. Wie zuvor erwähnt, stellen die Diagramme die Mittelwerte aus den Verbrauchsbestimmungen je Fahrzyklengruppe für die unterschiedlichen Bordnetzlastfälle dar. Die Einzelergebnisse für alle Fahrzyklen sind exemplarisch für den Bordnetzlastfall „Nur Grundlast“ im Szenario „Standard“ in **Bild 6-2** und für alle Bordnetzlastfälle im Anhang K zu finden. Die errechneten Mittelwerte liegen im Bereich von $177 \text{ MJ (100km)}^{-1}$ bis $226 \text{ MJ (100km)}^{-1}$, entsprechend $5,4 \text{ l (100km)}^{-1}$ bis $7,0 \text{ l (100km)}^{-1}$, wobei der untere Heizwert von Benzin mit $32,5 \text{ MJ l}^{-1}$ angenommen wird. Der niedrigste Verbrauchsmittelwert ist in der Fahrzyklengruppe „Überland“ für den Lastfall „Nur Grundlast“ (GRL) und der Höchstwert in der Fahrzyklengruppe „Städtisch“ für den Lastfall „Frosttag“ (FRT) ermittelt worden.

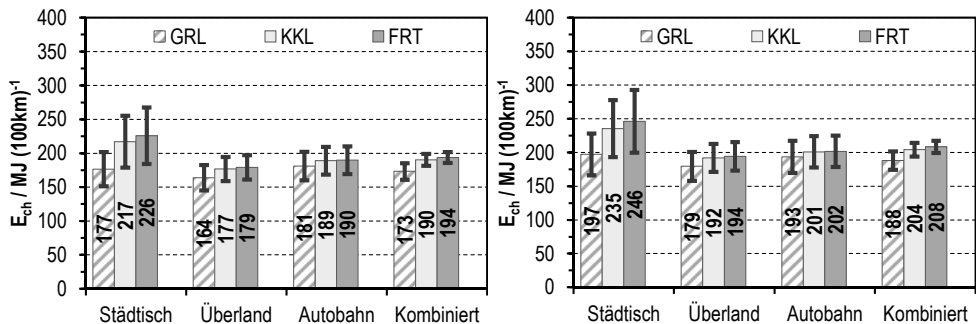
Bild 6-3: Mittlere Kraftstoffverbrauchswerte von ICV mit Ottomotor im Szenario „Standard“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment.

Werte für Bordnetzlast- und Klimatisierungsfälle laut Tab. 6-1. Fehlerindikatoren geben die Standardabweichungen innerhalb der Fahrzyklengruppen an.

ICV: Verbrennungsmotor-Pkw; FRT: „Frosttag“; GRL: „Nur Grundlast“; KKL: „Keine Klimatisierung“;

SOT: „Sommertag“ (für ICV in dieser Analyse nicht darstellbar).



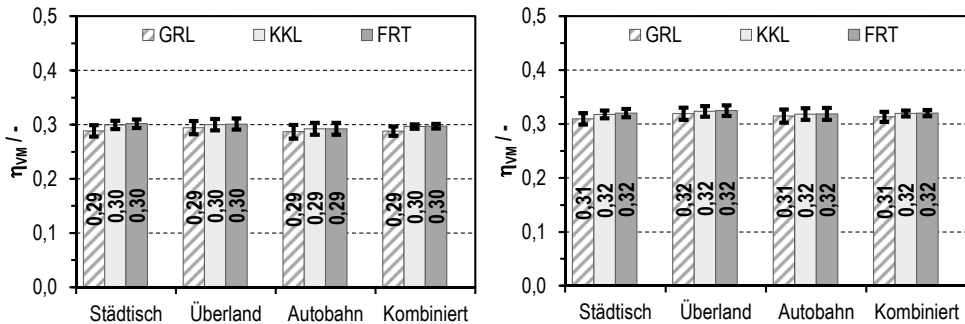
Das rechte Diagramm in **Bild 6-3** zeigt entsprechende Werte für das ICV des C-Segments. Hier liegen die mittleren Verbrauchsdaten zwischen $197 \text{ MJ (100km)}^{-1}$ und $246 \text{ MJ (100km)}^{-1}$ beziehungsweise $6,1 \text{ l (100km)}^{-1}$ und $7,6 \text{ l (100km)}^{-1}$. Die Fehlerindikatoren auf Basis der Standardabweichungen innerhalb der Fahrzyklengruppen zeigen, dass die Bandbreite der Ergebnisse je Bordnetzlastfall für städtische Fahrzyklen am größten ist. Insbesondere die Fahrzyklen ARTEMIS-Urban und MODEM-Slow urban weisen sehr hohe Energiebedarfe auf, die mit häufigen Beschleunigungs- und Bremsvorgängen und den nur geringen Zeitanteilen mit konstanter Geschwindigkeit zusammenhängen (siehe Anhang G). Bezogen auf jeweils alle Fahrzyklen der Fahrzyklengruppen liegt der

Variationskoeffizient der Verbrauchswerte über alle Bordnetzlastfälle in den städtischen Fahrzyklen am höchsten und beträgt jeweils 20 % im A- und C-Segment gegenüber Werten zwischen 7 % und 11 % für die Fahrzyklengruppen „Überland“, „Autobahn“ und „Kombiniert“.

Der Vergleich der Ergebnisse für den Lastfall GRL mit den für die übrigen Bordnetzlastfälle ermittelten Werten zeigt, dass der Anstieg der Verbrauchsdaten innerhalb der städtischen Fahrzyklen am größten ist. Im Lastfall „Keine Klimatisierung“ (KKL) steigt der Kraftstoffbedarf wegen der im Vergleich zum Lastfall GRL deutlich höheren Bordnetzlast an. Ursache für diesen starken Anstieg sind die geringen Durchschnittsgeschwindigkeiten vor allem beim MODEM-*Slow urban* mit rund 14 km h^{-1} und bei den Fahrzyklen ARTEMIS-*Urban* und ECE mit ca. 18 km h^{-1} . Zum Lastfall FRT steigen die Verbrauchswerte nochmals leicht an, was mit dem zusätzlichen Kraftstoffbedarf zur Kabinenheizung begründet wird. Im Vergleich aller Fahrzyklen ist dieser Mehrbedarf im ARTEMIS-*Urban* Fahrzyklus am größten. Bei Fahrzyklen mit höheren Motorleistungen fällt er dagegen kaum ins Gewicht. Trotz der zuvor beschriebenen Unsicherheiten bezüglich der Kennfelder und der Wärmeauskopplung, die in dieser Arbeit stark vereinfacht dargestellt wird, entspricht dies dem erwarteten Ergebnis, da Verbrennungsmotoren üblicherweise genügend Wärme zur Kabinenheizung bereitstellen. Ausgenommen sind Fahrsituationen mit geringer mechanischer Bedarfsleistung. In solchen Fällen können auch Motorleistung und anfallende Wärme zeitweise zu gering sein, um den Wärmebedarf zu decken.

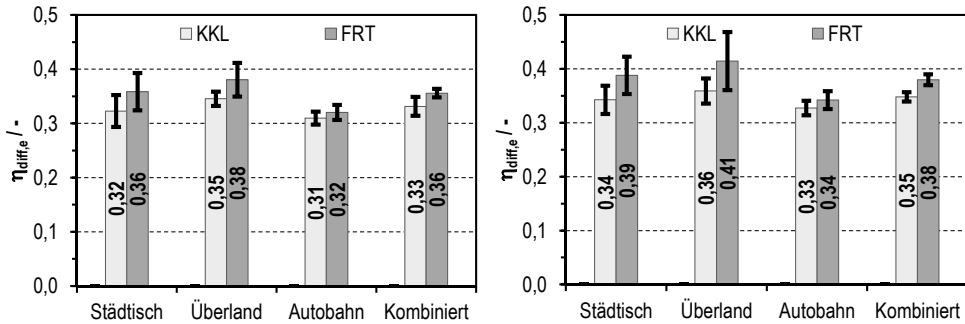
Bild 6-4: Mittlere Verbrennungsmotorwirkungsgrade von ICV mit Ottomotor im Szenario „Standard“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Weitere Informationen zur Darstellung, siehe Bild 6-3.



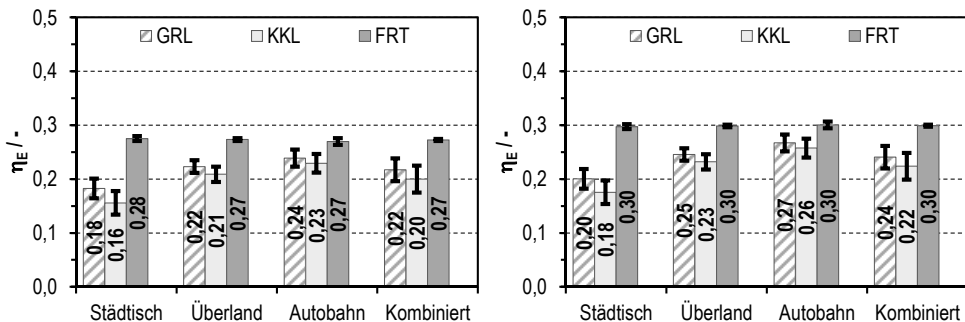
Mittlere Verbrennungsmotorwirkungsgrade liegen, wie **Bild 6-4** zeigt, zwischen 29 % und 32 %, wobei höhere Wirkungsgrade bei höherer Motorbeanspruchung erreicht werden. Besonders die Zusatzleistung zur Stromerzeugung bewirkt einen erhöhten mittleren Wirkungsgrad, da Betriebszeiten im Bereich sehr kleiner Teillast reduziert werden.

Bild 6-5: Mittlere differentielle Wirkungsgrade der Stromerzeugung bei ICV mit Ottomotor im Szenario „Standard“.
 Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Weitere Informationen zur Darstellung, siehe Bild 6-3.



Die ermittelten Werte des differentiellen Wirkungsgrads (siehe Gl. 2-2) können **Bild 6-5** entnommen werden. Die dargestellten Wirkungsgrade und Fehlerbalken zeigen, dass diese Ergebnisse stärker von den Eigenschaften des Fahrzyklus abhängen. Die Ursache liegt darin, dass bereits kleine Abweichungen in den Basisdaten – also in den absoluten Verbrauchswerten und der bereitgestellten elektrischen Energie – das Ergebnis stark beeinflussen. Solche Abweichungen können bereits aufgrund einer unterschiedlich genauen Einhaltung der Fahrzyklusvorgaben im Rahmen der Toleranz von $\pm 2 \text{ km h}^{-1}$ hervorgerufen werden. Darüber hinaus können auch Schaltpunkte aufgrund der Betriebsstrategie unterschiedlich gewählt werden, was durch entsprechende Betriebspunktverschiebungen den Verbrauch beeinflusst. Die Analyse der an dieser Stelle nicht dargestellten Einzelwerte der Lastfälle KKL und FRT zeigt, dass trotz einer sehr guten Übereinstimmung der elektrischen Energiebedarfswerte des 14 V-Bordnetzes die Kraftstoffverbrauchswerte um bis zu $5 \text{ MJ (100km)}^{-1}$ schwanken.

Bild 6-6: Mittlere energetische Nutzungsgrade von ICV mit Ottomotor im Szenario „Standard“.
 Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Weitere Informationen zur Darstellung, siehe Bild 6-3.

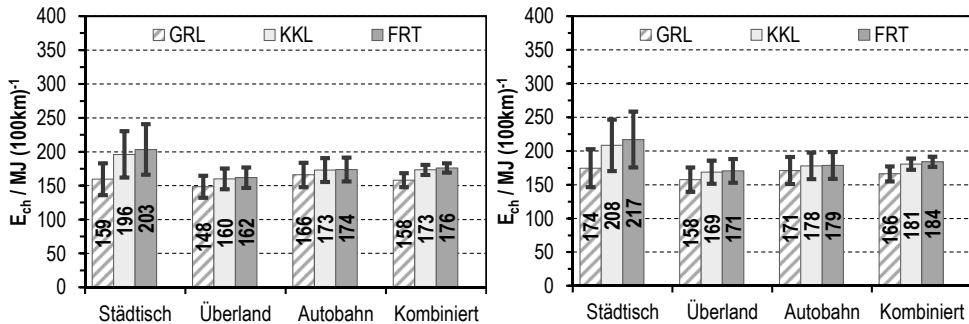


Abschließend zur Datenanalyse für ICV soll noch auf den energetischen Nutzungsgrad (siehe Gl. 6-1) eingegangen werden. Die dafür in **Bild 6-6** angegebenen Werte sind in den Lastfällen GRL und KKL geringer als die Verbrennungsmotorwirkungsgrade laut **Bild 6-4**.

Ursache dafür ist, dass in dieser Berechnung die als Nutzenergie betrachtete Energie am Rad – und damit einschließlich der Verluste der Kraftübertragung – im Verhältnis zur Summe der Energien des umgesetzten Kraftstoffs und der rekuperierbaren Energie am Rad betrachtet wird. Im Lastfall FRT ist der energetische Nutzungsgrad aufgrund der VM-Abwärmenutzung deutlich höher als bei den Lastfällen GRL und KKL.

Bild 6-7: Mittlere Kraftstoffverbrauchswerte von ICV mit Ottomotor im Szenario „Zukunft“.

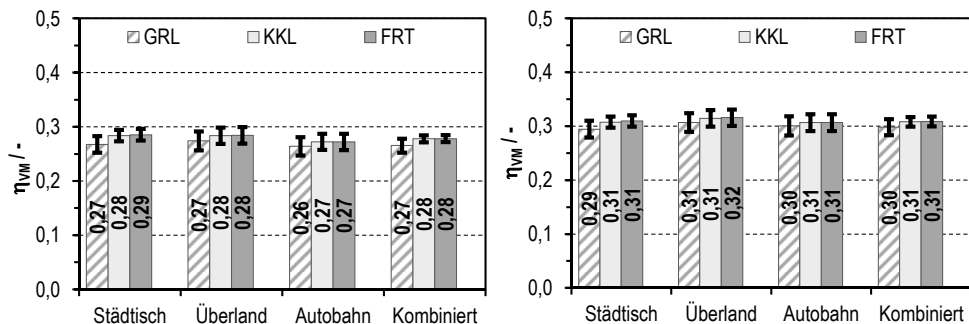
Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Weitere Informationen zur Darstellung, siehe Bild 6-3.



Für das Berechnungsszenario „Zukunft“ wurden die Kraftstoffverbrauchswerte entsprechend **Bild 6-7** ermittelt. Die Mittelwerte in den Fahrzyklengruppen liegen im A-Segment zwischen $148 \text{ MJ (100km)}^{-1}$ für Überlandfahrzyklen im Lastfall GRL und $203 \text{ MJ (100km)}^{-1}$ für städtische Fahrzyklen im Lastfall FRT. Kraftstoffverbrauchswerte können dementsprechend zwischen $4,6 \text{ l (100km)}^{-1}$ und $6,2 \text{ l (100km)}^{-1}$ angegeben werden. Mittelwerte für das ICV des C-Segments liegen zwischen $158 \text{ MJ (100km)}^{-1}$ und $217 \text{ MJ (100km)}^{-1}$ beziehungsweise $4,9 \text{ l (100km)}^{-1}$ und $6,7 \text{ l (100km)}^{-1}$. Die Variationskoeffizienten sind denen im Szenario „Standard“ vergleichbar.

Bild 6-8: Mittlere Verbrennungsmotorwirkungsgrade von ICV mit Ottomotor im Szenario „Zukunft“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Weitere Informationen zur Darstellung, siehe Bild 6-3.

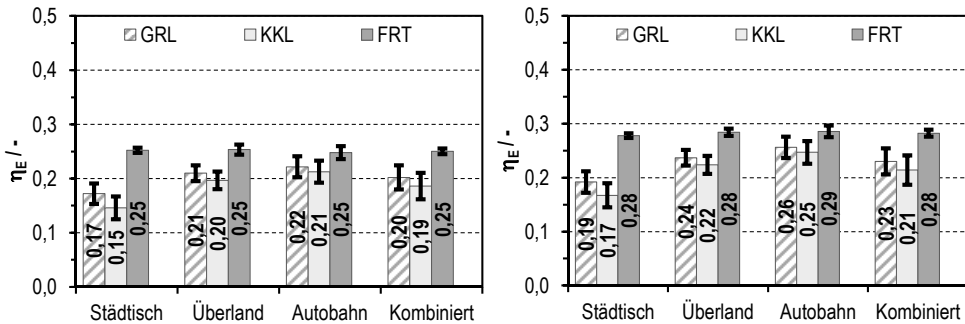


Die Verbrauchsreduktion im Vergleich der Szenarien „Standard“ und „Zukunft“ liegt im Mittel aller Fahrzyklen und Bordnetzlastfälle bei 10 %. Der Vergleich von **Bild 6-8** mit Bild 6-4

macht deutlich, dass trotz der Anpassung der Kennfelder für das Szenario „Zukunft“ laut Tab. 6-3 der Verbrennungsmotorwirkungsgrad nahezu unverändert bleibt.

Bild 6-9: Mittlere energetische Nutzungsgrade von ICV mit Ottomotor im Szenario „Zukunft“.

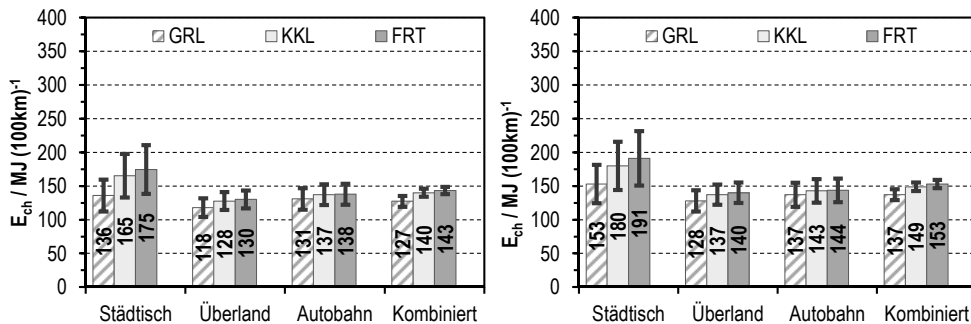
Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Weitere Informationen zur Darstellung, siehe Bild 6-3.



In einigen Fahrzyklengruppen und Lastfällen wurden leicht reduzierte VM-Wirkungsgrade ermittelt. Eine detaillierte Analyse zeigt, dass geringere Wirkungsgrade im Szenario „Zukunft“ bei Fahrzyklen mit geringen Motorlasten auftreten, wie zum Beispiel beim Europäischen Fahrzyklus MVEG und dessen Teilzyklen ECE und EUDC. Aufgrund der geringeren Fahrwiderstände wird der VM demnach in Betriebspunkten mit ungünstigeren Wirkungsgraden betrieben. Die energetischen Nutzungsgrade ändern sich in vergleichbarer Weise (siehe Bild 6-9).

Bild 6-10: Mittlere Kraftstoffverbrauchswerte von ICV mit Dieselmotor im Szenario „Zukunft“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Weitere Informationen zur Darstellung, siehe Bild 6-3.



Für das ICV mit Dieselmotor zeigt Bild 6-10 Verbrauchsmittelwerte im Szenario „Zukunft“ für beide hier betrachtete Fahrzeugklassen. Der Mittelwert des Verbrauchsreduktionspotentials beträgt gegenüber den hier nicht dargestellten Werten für das Szenario „Standard“ etwa 6 %.

Tab. 6-5: Verbrauchswerte von ICV für unterschiedliche Fahrzyklen und Bordnetzlastfälle.

Erste Zeile: Wertebereich für Verbrauchsberechnungen bezogen auf alle 25 Fahrzyklen (keine Mittelwerte);

zweite Zeile: ECE | EUDC | MVEG;

dritte Zeile: WLTC-Low | WLTC-Middle | WLTC-High | WLTC-Very high.

Angaben für Verbrennungsmotor-Pkw mit Ottomotor (ICV-G) in Liter Benzin je 100km bei einem Heizwert von $32,5 \text{ MJ l}^{-1}$ und mit Dieselmotor (ICV-D) in Liter Diesel je 100km bei einem Heizwert von $35,5 \text{ MJ l}^{-1}$.

$l_{\text{Benzin Diesel}} (100\text{km})^{-1}$	A-Segment		C-Segment	
Pkw-Topologie	„Standard“	„Zukunft“	„Standard“	„Zukunft“
ICV-G „Nur Grundlast“ (GRL)	4,4 – 6,9	4,1 – 6,2	4,7–7,9	4,2 – 7,0
	5,3 4,7 4,9	4,9 4,4 4,6	5,8 5,1 5,3	5,2 4,5 4,8
	5,1 4,6 4,6 5,1	4,5 4,1 4,2 4,6	5,7 5,0 5,0 5,5	5,0 4,4 4,4 4,8
ICV-G „Frosttag“ (FRT)	4,7 – 9,2	4,4 – 8,3	5,0 – 10,0	4,4 – 8,9
	6,9 5,2 5,8	6,3 4,7 5,3	7,5 5,5 6,2	6,6 4,9 5,5
	7,2 5,2 5,1 5,7	6,5 4,7 4,7 5,2	7,7 5,7 5,4 6,1	6,8 5,0 4,8 5,4
ICV-G „Keine Klimatisierung“ (KKL)	4,7 – 8,7	4,4 – 7,8	4,9 – 9,3	4,4 – 8,3
	6,5 5,1 5,6	5,9 4,7 5,1	7,0 5,4 6,0	6,2 4,8 5,4
	6,9 5,1 5,0 5,6	6,2 4,6 4,6 5,1	7,3 5,6 5,4 6,0	6,5 4,9 4,8 5,3
ICV-D „Nur Grundlast“ (GRL)	2,9 – 5,1	2,9 – 5,0	3,2 – 6,1	3,0 – 5,7
	3,8 3,2 3,4	3,9 3,1 3,4	4,4 3,6 3,9	4,3 3,3 3,7
	3,8 3,2 3,2 3,5	3,7 3,0 3,1 3,4	4,4 3,7 3,5 4,0	4,1 3,3 3,3 3,6
ICV-D „Frosttag“ (FRT)	3,2 – 7,1	3,1 – 6,8	3,4 – 7,9	3,2 – 7,3
	5,2 3,5 4,1	5,0 3,4 4,0	5,8 3,9 4,6	5,5 3,6 4,3
	5,4 3,8 3,5 4,0	5,2 3,5 3,4 3,9	5,9 4,2 3,9 4,5	5,6 3,9 3,6 4,1
ICV-D „Keine Klimatisierung“ (KKL)	3,1 – 6,4	3,1 – 6,2	3,4 – 7,1	3,2 – 6,7
	4,7 3,5 3,9	4,6 3,3 3,8	5,3 3,8 4,4	5,1 3,5 4,1
	5,0 3,6 3,5 3,9	4,9 3,4 3,3 3,8	5,5 4,1 3,8 4,3	5,2 3,7 3,5 4,0

Zusammenfassend enthält **Tab. 6-5** Verbrauchsdaten aus den in dieser Arbeit durchgeführten Simulationsrechnungen zu ICV. Der Wertebereich der jeweils ersten Zeile bezieht sich auf alle hier verwendeten Fahrzyklen. Die zweite Zeile enthält die Angaben für den Europäischen Fahrzyklus MVEG und seinen Teilzyklen in der Reihenfolge ECE, EUDC und MVEG. In der dritten Zeile sind die Werte des WLTC in der Reihenfolge WLTC-Low, WLTC-Middle, WLTC-High und WLTC-Very high angegeben.

6.2.2 Parallelhybrid-Pkw – PAH

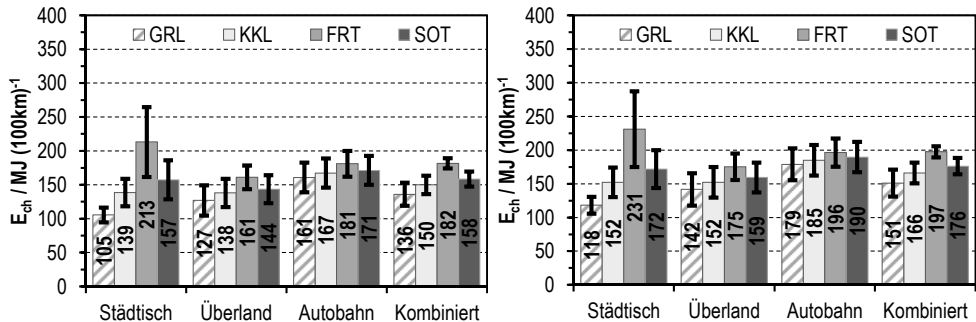
Für PAH sind die Ergebnisse der Kraftstoffverbrauchsbestimmung, bezogen auf das Szenario „Standard“, und für beide untersuchte Fahrzeugklassen in **Bild 6-11** wiedergegeben. Beim Pkw des A-Segments liegen die Verbrauchswerte zwischen $105 \text{ MJ } (100\text{km})^{-1}$ und $213 \text{ MJ } (100\text{km})^{-1}$, jeweils in der Fahrzyklengruppe „Städtisch“ für die Lastfälle „Nur Grundlast“ (GRL) beziehungsweise „Frosttag“ (FRT). Diese Angaben entsprechen bei einem Heizwert von $32,5 \text{ MJ l}^{-1}$ einem Verbrauch von $3,2 \text{ l } (100\text{km})^{-1}$ beziehungsweise $6,6 \text{ l } (100\text{km})^{-1}$. Im C-Segment wurden etwas höhere Verbrauchsmittelwerte zwischen $118 \text{ MJ } (100\text{km})^{-1}$ und $231 \text{ MJ } (100\text{km})^{-1}$ beziehungsweise zwischen $3,6 \text{ l } (100\text{km})^{-1}$ und $7,1 \text{ l } (100\text{km})^{-1}$ ermittelt. Maximal- und Minimalwert liegen hier in der Fahrzyklengruppe „Städtisch“. Der direkte Vergleich mit den Verbrauchswerten für ICV zeigt, dass für jede Fahrzyklengruppen sowie für jeden Bordnetzlastfall der Kraftstoffverbrauch bei PAH reduziert ist. Die Vorteile sind in städtischen Fahrzyklen am höchsten mit Ausnahme des Lastfalls mit der höchsten Bordnetzleistung.

Bild 6-11: Mittlere Kraftstoffverbrauchswerte von PAH mit Ottomotor im Szenario „Standard“.

Links: A-Segment; **rechts:** C-Segment.

Werte für Bordnetzlast- und Klimatisierungsfälle laut Tab. 6-1. Fehlerindikatoren geben die Standardabweichungen innerhalb der Fahrzyklengruppen an.

PAH: Parallelhybrid-Pkw; **FRT:** „Frosttag“; **GRL:** „Nur Grundlast“; **KKL:** „Keine Klimatisierung“; **SOT:** „Sommertag“.



In allen Fahrzyklengruppen steigen die Verbrauchswerte mit dem lastfallspezifischen Strombedarf in der Reihenfolge GRL, KKL, SOT, FRT. Auffällig ist dabei die im Vergleich zu ICV deutlichere Spreizung der Mittelwerte in den städtischen Fahrzyklen. Die Variationskoeffizienten liegen in der Fahrzyklengruppe „Städtisch“ mit 32 % im A-Segment und 31 % im C-Segment einerseits deutlich höher im Vergleich zu den anderen Fahrzyklen mit Variationskoeffizienten zwischen 12 % und 16 %. Andererseits sind die Variationskoeffizienten in der Fahrzyklengruppe „Städtisch“ auch signifikant größer als die Angaben für ICV mit 20 % (siehe Unterabschnitt 6.2.1).

Elektrische Leistungen im Bordnetz wirken sich demnach besonders stark auf den Kraftstoffverbrauch in städtischen Fahrzyklen aus. Großen Einfluss auf Mittelwert und Standardabweichung haben dabei in dieser Fahrzyklengruppe die Fahrzyklen

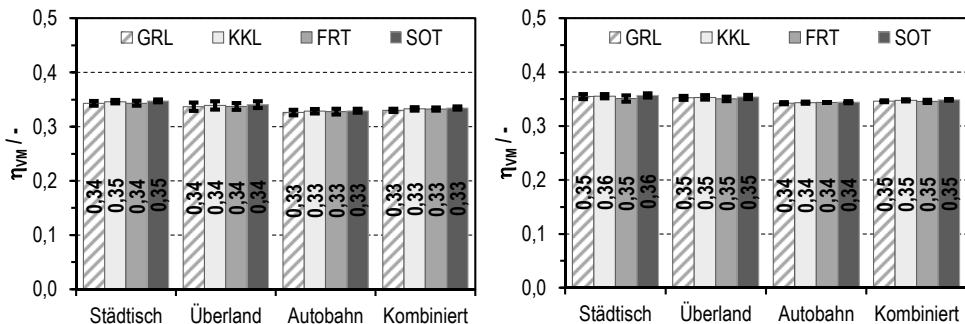
ARTEMIS-Urban und MODEM-Slow urban, bei denen die Verbrauchswerte im beispielweise im C-Segment mit $288 \text{ MJ } (100\text{km})^{-1}$ beziehungsweise $351 \text{ MJ } (100\text{km})^{-1}$ deutlich oberhalb des Mittelwertes von $231 \text{ MJ } (100\text{km})^{-1}$ liegen.

Beispielhaft soll an dieser Stelle die Energiebilanz für den Pkw des C-Segments bezogen auf den städtischen Fahrzyklus MODEM-Slow urban in den Lastfällen FRT und GRL detailliert dargestellt werden, der den höchsten Kraftstoffbedarf aufweist. Im Lastfall FRT liegt der Kraftstoffverbrauch mit $351 \text{ MJ } (100\text{km})^{-1}$ fast dreimal so hoch wie im Lastfall GRL mit $129 \text{ MJ } (100\text{km})^{-1}$. Die mechanische Energie am Rad beträgt in beiden Lastfällen $53 \text{ MJ } (100\text{km})^{-1}$ und am Getriebeeingang $56 \text{ MJ } (100\text{km})^{-1}$. Die Elektromaschine (EM) trägt motorisch nur im Lastfall GRL mit $17 \text{ MJ } (100\text{km})^{-1}$ deutlich zur Deckung der mechanischen Antriebsenergie bei. Im Lastfall FRT wird die Antriebsenergie fast ausschließlich vom Verbrennungsmotor (VM) bereitgestellt. Der Anteil der EM ist mit $1,3 \text{ MJ } (100\text{km})^{-1}$ dann sehr gering. Die Schlussfolgerung ist, dass es im Falle hoher Bordnetzlast günstiger ist, den VM durch Anwendung der Hybridfunktion Lastpunktanhebung sowohl zur Deckung der Antriebsleistung als auch zur Stromerzeugung zu nutzen. Im Lastfall GRL ist es aufgrund der geringen Bedarfsleistung des Antriebs und des Bordnetzes günstiger, Strom aus der Batterie zum batterieelektrischen (BE-) Fahren zu nutzen, als den VM bei geringem Drehmoment und dann niedrigem Wirkungsgrad zu betreiben. Der Bedarf an elektrischer Leistung ist im Lastfall GRL mit $13 \text{ MJ } (100\text{km})^{-1}$ deutlich geringer im Vergleich zum Lastfall FRT mit $55 \text{ MJ } (100\text{km})^{-1}$.

Dieses Beispiel verdeutlicht, dass in städtischen Fahrzyklen, die eine geringe Durchschnittsgeschwindigkeit aufweisen, der Strombedarf einen maßgeblichen Einfluss auf den Kraftstoffverbrauch haben kann und begründet die großen Unterschiede in den Verbrauchswerten gemäß **Bild 6-11**.

Bild 6-12: Mittlere Verbrennungsmotorwirkungsgrade von PAH mit Ottomotor im Szenario „Standard“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Weitere Informationen zur Darstellung, siehe Bild 6-11.

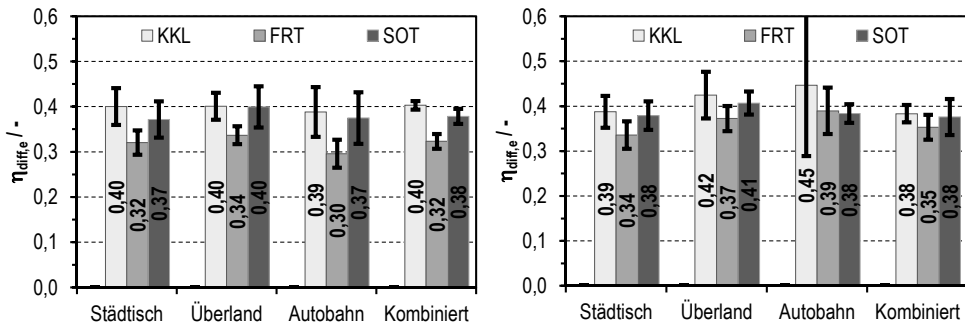


Mittlere Verbrennungsmotorwirkungsgrade liegen, wie **Bild 6-12** zeigt, relativ konstant zwischen 33 % und 35 %. Diese im Vergleich zu ICV (siehe Bild 6-4) deutlich höheren Werte sind auf die Wirkung der verbrauchsoptimierenden Laststeuerung zurückzuführen. Der VM-Betrieb bei kleiner Motorlast und damit niedrigem Wirkungsgrad wird durch die Anwen-

derung von Betriebs- und Lastpunktverschiebung sowie durch batterieelektrisches (BE-) Fahren reduziert. Dieser Vorteil gilt besonders in städtischen Fahrzyklen mit geringer mechanischer Bedarfsleistung.

Bild 6-13: Mittlere differentielle Wirkungsgrade der Stromerzeugung bei PAH mit Ottomotor im Szenario „Standard“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Weitere Informationen zur Darstellung, siehe Bild 6-11.



Die errechneten mittleren differentiellen Wirkungsgrade der Stromerzeugung (siehe Gl. 2-2, S. 7) können **Bild 6-13** entnommen werden. Im direkten Vergleich zu ICV (Bild 6-5) wird deutlich, dass beim Lastfall KKL die Mittelwerte für PAH höher liegen. Dieser Effekt ist ebenfalls der verbrauchsoptimierenden Laststeuerung zuzuordnen. Der Lastfall FRT ist mit ICV nicht vergleichbar, da aufgrund der Nutzung elektrischer Leistung zur Kabinenheizung bei PAH deutliche Unterschiede im Betrag der motorgekoppelt erzeugten elektrischen Energie bestehen.

Bild 6-14: Mittlere energetische Nutzungsgrade von PAH mit Ottomotor im Szenario „Standard“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Weitere Informationen zur Darstellung, siehe Bild 6-11.

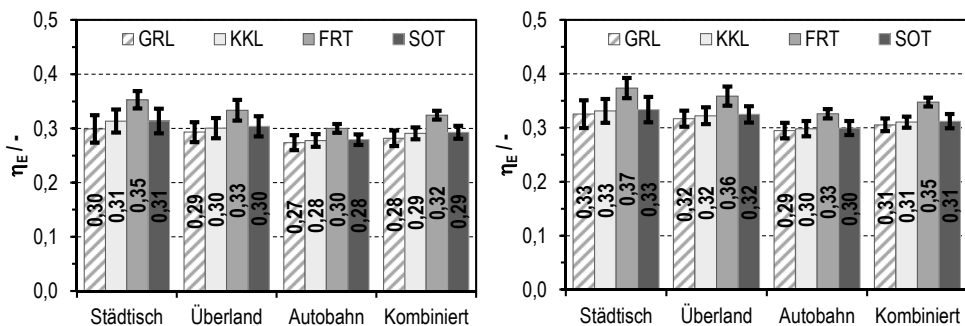
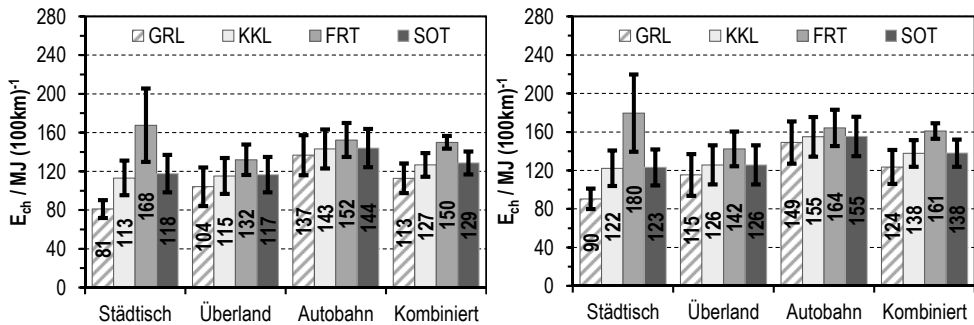


Bild 6-14 gibt die ermittelten energetische Nutzungsgrade (siehe Gl. 6-1) wieder. Innerhalb der Fahrzyklengruppen sind die Werte vergleichsweise einheitlich. Nur im Lastfall FRT können leicht erhöhte energetische Nutzungsgrade festgestellt werden. Analog zu ICV (Bild 6-6) wirkt sich hier die Abwärmenutzung günstig auf den Nutzungsgrad aus.

Insgesamt sind auch diese Werte deutlich höher im Vergleich zu ICV. Neben der verbrauchsoptimierenden Laststeuerung wirkt sich hier besonders das rekuperative Bremsen aus. Ein Teil der bereitgestellten mechanischen Antriebsleistung wird auf diesem Wege dem System in Form von elektrischer Leistung zur zeitgleichen Nutzung im Bordnetz oder zur zeitverzögerten Nutzung in Bordnetz oder Antrieb zugeführt. Dieser Effekt gilt in besonderer Weise in Fahrzyklen mit häufigem Wechsel von Beschleunigungs- und Verzögerungsphasen und bei geringen Geschwindigkeiten. In diesen Fällen geht nur ein geringer Betrag an kinetischer Energie durch die Wirkung von Luft- und Rollwiderstand verloren. Die mittleren energetischen Nutzungsgrade sind dementsprechend in den städtischen Fahrzyklen am höchsten.

Bild 6-15: Mittlere Kraftstoffverbrauchswerte von PAH mit Ottomotor im Szenario „Zukunft“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Weitere Informationen zur Darstellung, siehe Bild 6-11.



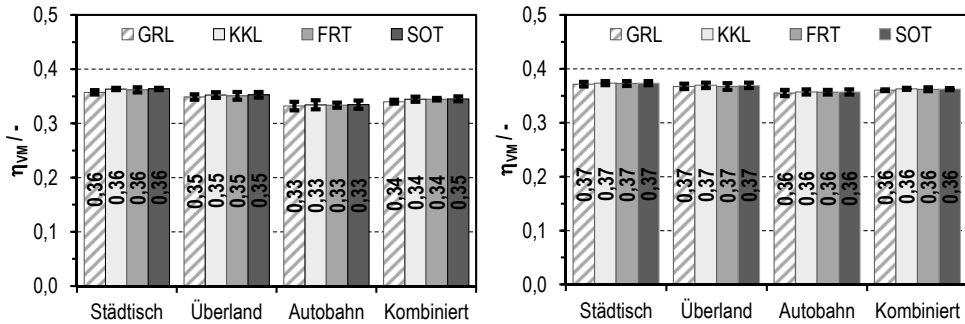
Für das Berechnungsszenario „Zukunft“ wurden die Kraftstoffverbrauchswerte entsprechend **Bild 6-15** ermittelt. Der im Vergleich zu Bild 6-11 nochmals stark reduzierte Verbrauch im Lastfall GRL in städtischen Fahrzyklen geht auch auf die Nutzung des thermoelektrischen Generators (TEG) zurück. In diesem Lastfall wird das 14 V-Bordnetz während des VM-Betriebs fast vollständig vom TEG versorgt.

Die höchsten Verbrauchsreduktionen im Vergleich der Szenarien „Standard“ und „Zukunft“ wurden für PAH des A-Segments mit 18 % bis 25 % in den städtischen Fahrzyklen ermittelt. Mit Mittelwerten von 16 % bis 19 % fallen die Werte für Überland- und kombinierte Fahrzyklen etwas geringer aus. Bei Autobahnfahrzyklen liegt die Reduktion im Mittel bei 15 % bis 16 %.

Der Vergleich von **Bild 6-16** mit Bild 6-12 macht deutlich, dass für das Szenario „Zukunft“ der Verbrennungsmotorwirkungsgrad nur geringfügig ansteigt. Ebenso wie bei den energetischen Nutzungsgraden (**Bild 6-17**) wirken sich hier die verbesserten Komponentenwirkungsgrade aus.

Bild 6-16: Mittlere Verbrennungsmotorwirkungsgrade von PAH mit Ottomotor im Szenario „Zukunft“.

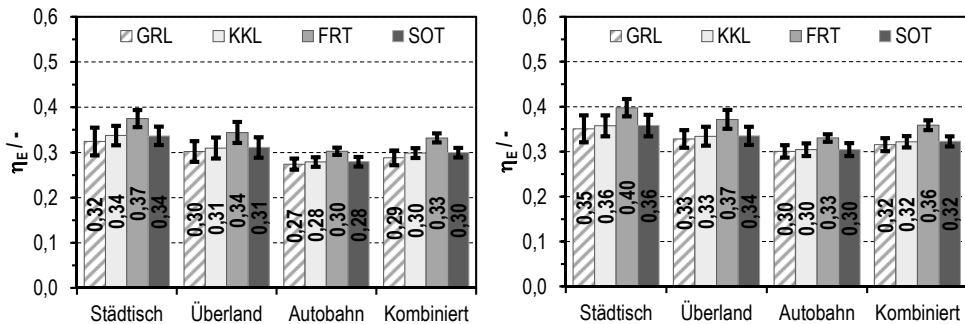
Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Weitere Informationen zur Darstellung, siehe Bild 6-11.



Wie aus dem Vergleich von **Bild 6-17** mit Bild 6-14 hervorgeht, sind auch die mittleren energetischen Nutzungsgrade für das Szenario „Zukunft“ gegenüber den Werten des Szenarios „Standard“ leicht erhöht.

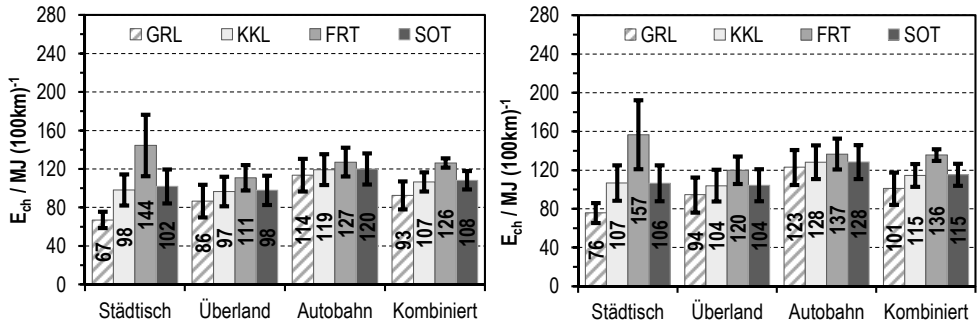
Bild 6-17: Mittlere energetische Nutzungsgrade von PAH mit Ottomotor im Szenario „Zukunft“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Weitere Informationen zur Darstellung, siehe Bild 6-11.



Die Kraftstoffverbrauchswerte für den PAH mit Dieselmotor im Szenario „Zukunft“ gibt **Bild 6-18** für beide hier betrachtete Fahrzeugklassen wieder. Das Verbrauchsreduktionspotential gegenüber den hier nicht dargestellten Werten für das Szenario „Standard“ ist im Vergleich zu PAH mit Ottomotor etwas geringer.

Bild 6-18: Mittlere Kraftstoffverbrauchswerte von PAH mit Dieselmotor im Szenario „Zukunft“.
Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Weitere Informationen zur Darstellung, siehe Bild 6-11.



Zusammenfassend enthält **Tab. 6-6** die mittleren Verbrauchswerte sowie die Werte für den MVEG- und den WLTC-Fahrzyklus, einschließlich deren Teilzyklen.

Tab. 6-6: Verbrauchswerte von PAH für unterschiedliche Fahrzyklen und Bordnetzlastfälle.
Erste Zeile: Wertebereich für Verbrauchsberechnungen bezogen auf alle 25 Fahrzyklen (keine Mittelwerte);
zweite Zeile: ECE | EUDC | MVEG;
dritte Zeile: WLTC-Low | WLTC-Middle | WLTC-High | WLTC-Very high.
Angaben für Parallelhybrid mit Ottomotor (PAH-G) in Liter Benzin je 100km bei einem Heizwert von 32,5 MJ l⁻¹ und mit Dieselmotor (PAH-D) in Liter Diesel je 100km bei einem Heizwert von 35,5 MJ l⁻¹.

<i>l_{Benzin Diesel}</i> (100km) ⁻¹	A-Segment		C-Segment	
Pkw-Topologie	„Standard“	„Zukunft“	„Standard“	„Zukunft“
PAH-G „Nur Grundlast“ (GRL)	2,8 – 5,4	2,0 – 4,7	3,1–6,0	2,2 – 5,1
	3,2 4,0 3,7	2,5 3,3 3,0	3,5 4,3 4,0	2,8 3,5 3,3
	2,8 3,0 3,6 3,9	2,0 2,3 2,9 3,2	3,1 3,3 4,0 4,3	2,2 2,6 3,2 3,5
PAH-G „Frosttag“ (FRT)	4,5 – 9,9	3,6 – 7,5	4,9 – 10,8	3,8 – 8,0
	7,1 4,8 5,7	5,7 4,0 4,7	7,7 5,2 6,1	6,1 4,2 5,0
	6,9 4,5 4,6 5,2	5,3 3,6 3,8 4,3	7,5 5,9 5,0 5,7	5,7 3,8 4,0 4,6
PAH-G „Keine Klimatisierung“ (KKL)	3,4 – 5,6	2,7 – 4,9	3,8 – 6,2	3,0 – 5,2
	4,5 4,3 4,2	3,4 3,6 3,6	4,7 4,5 4,6	3,7 3,8 3,9
	4,1 3,4 3,9 4,3	3,3 2,7 3,3 3,6	4,6 3,8 4,3 4,8	3,6 3,0 3,6 3,9
PAH-G „Sommertag“ (SOT)	3,7 – 6,6	2,8 – 4,9	4,1 – 6,8	3,0 – 5,3
	5,3 4,5 4,7	3,6 3,6 3,6	5,8 4,7 5,2	3,7 3,8 3,8
	4,8 3,7 4,0 4,5	3,5 2,8 3,3 3,7	5,2 4,1 4,5 5,0	3,7 3,0 3,6 3,9

Fortsetzung von Tab. 6-6.

$l_{Benzin Diesel} (100km)^{-1}$	A-Segment		C-Segment	
Pkw-Topologie	„Standard“	„Zukunft“	„Standard“	„Zukunft“
PAH-D „Nur Grundlast“ (GRL)	2,1 – 3,9	1,5 – 3,5	2,3 – 4,3	1,8 – 3,8
	2,2 2,7 2,5	1,7 2,5 2,1	2,4 3,0 2,8	1,8 2,6 2,3
	2,1 2,2 2,6 2,8	1,5 1,8 2,2 2,4	2,3 2,6 2,9 3,1	1,8 1,9 2,4 2,6
PAH-D „Frosttag“ (FRT)	3,3 – 7,9	2,8 – 5,9	3,5 – 8,6	3,0 – 6,4
	5,6 3,4 4,2	4,4 3,0 3,6	6,1 3,8 4,6	4,7 3,3 3,8
	5,6 3,4 3,4 3,9	4,3 2,8 2,9 3,4	6,0 3,8 3,7 4,2	4,7 3,0 3,1 3,6
PAH-D „Keine Klimatisierung“ (KKL)	2,6 – 4,3	2,2 – 3,7	2,9 – 4,6	2,3 – 4,0
	3,4 3,0 3,1	2,8 2,7 2,7	3,5 3,3 3,4	3,2 2,8 2,9
	3,3 2,6 2,9 3,2	2,7 2,2 2,5 2,8	3,5 2,9 3,2 3,5	2,9 2,3 2,7 3,0
PAH-D „Sommertag“ (SOT)	2,8 – 5,0	2,2 – 3,8	3,2 – 5,4	2,3 – 4,0
	3,9 3,1 3,4	2,9 2,7 2,8	4,2 3,4 3,7	2,8 2,8 2,9
	3,7 2,8 3,0 3,4	2,8 2,2 2,5 2,9	4,0 3,2 3,4 3,7	3,0 2,3 2,7 3,0

6.2.3 Batterie-Pkw – BEV

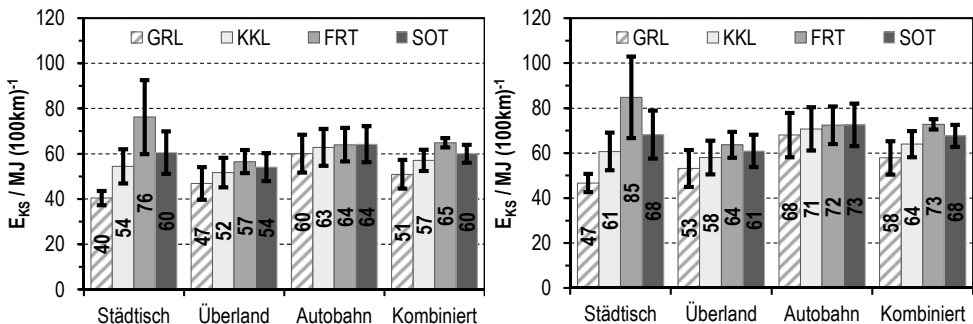
Die Spannweite der Mittelwerte des Stromverbrauchs bei Elektro-Pkw mit Batterie reicht im A-Segment von $40 MJ(100km)^{-1}$ bis $76 MJ(100km)^{-1}$, wobei beide Werte in der Fahrzyklen-Gruppe „Städtisch“ für unterschiedliche Lastfälle ermittelt wurden (Bild 6-19). Im C-Segment liegen die Werte zwischen $47 MJ(100km)^{-1}$ und $85 MJ(100km)^{-1}$.

Bild 6-19: Mittlere Stromverbrauchswerte von BEV im Szenario „Standard“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment.

Werte für Bordnetzlast- und Klimatisierungsfälle laut Tab. 6-1. Fehlerindikatoren geben die Standardabweichungen innerhalb der Fahrzyklengruppen an.

BEV: Batterie-Pkw; FRT: „Frosttag“; GRL: „Nur Grundlast“; KKL: „Keine Klimatisierung“; SOT: „Sommertag“.

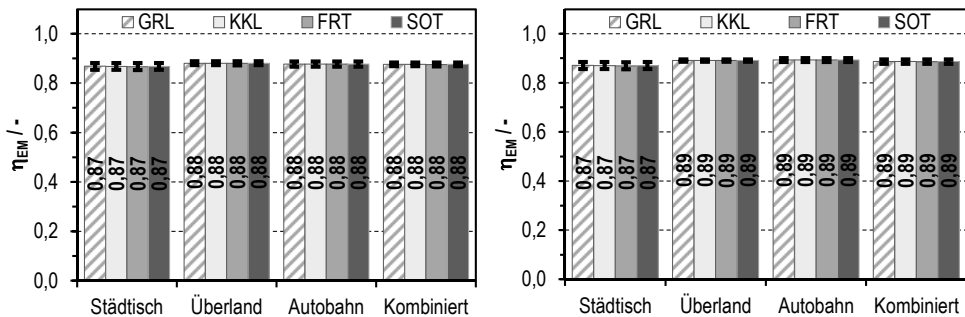


Auch bei BEV steigen die Verbrauchswerte in allen Fahrzyklengruppe mit dem Strombedarf des Bordnetzes. Die größte Spreizung der Mittelwerte ist wie schon bei ICV und PAH für die städtischen Fahrzyklen erkennbar. Der Variationskoeffizient liegt hier bei 28 % im A-Segment und 27 % im C-Segment. Die Abweichungen sind am geringsten mit Variationskoeffizienten von jeweils 11 % bei den kombinierten Fahrzyklen.

Die Wirkungsgrade der Elektromaschine weichen, wie in **Bild 6-20** zu erkennen ist, in allen Fahrzyklengruppen kaum voneinander ab und liegen zwischen 87 % und 88 % für den Pkw des A-Segments und zwischen 87 % und 89 % für den Pkw des C-Segments.

Bild 6-20: Mittlere Elektromaschinenwirkungsgrade (Motorbetrieb) von BEV im Szenario „Standard“.

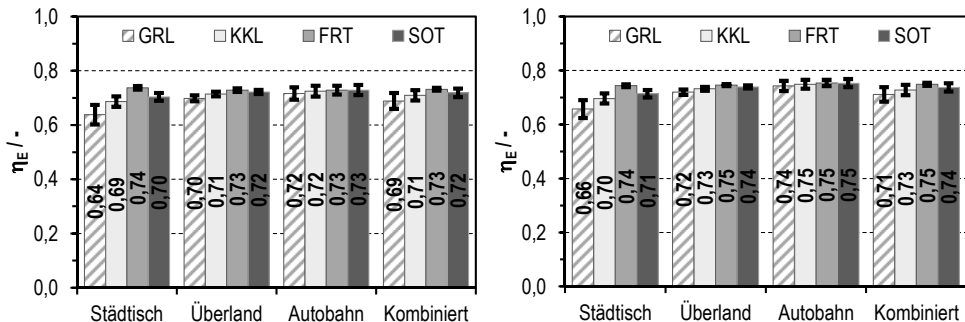
Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Weitere Informationen zur Darstellung, siehe Bild 6-19.



Mittlere Wirkungsgrade der Elektromaschine im Generatorbetrieb liegen bei ebenfalls geringen Unterschieden in den Fahrzyklengruppen etwa 4 % bis 5 % unter denen des Motorbetriebs.

Bild 6-21: Mittlere energetische Nutzungsgrade von BEV im Szenario „Standard“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Weitere Informationen zur Darstellung, siehe Bild 6-19.



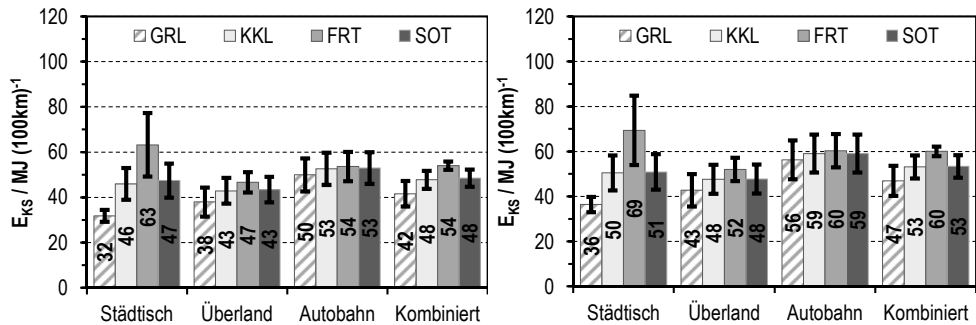
Die mittleren energetischen Nutzungsgrade (siehe Gl. 6-1) steigen innerhalb der Fahrzyklengruppe ebenfalls mit dem Strombedarf, weichen jedoch im Vergleich zu ICV und PAH in geringerem Maße voneinander ab (**Bild 6-21**). Grund dafür ist das geringere Abwärme-

angebot der Elektromaschine im Vergleich zum Verbrennungsmotor. Die Werte liegen aufgrund der hohen Effizienz deutlich oberhalb der für ICV und PAH ermittelten Daten.

Im Szenario „Zukunft“ sind die Verbrauchswerte, wie der Vergleich von **Bild 6-22** und Bild 6-19 zeigt, deutlich reduziert. Das Reduktionspotential liegt, gemittelt über die Fahrzyklengruppen, im Vergleich zum Szenario „Standard“ im A- und C-Segment bei 14 % bis 17 %.

Bild 6-22: Mittlere Kraftstoffverbrauchswerte von BEV im Szenario „Zukunft“.

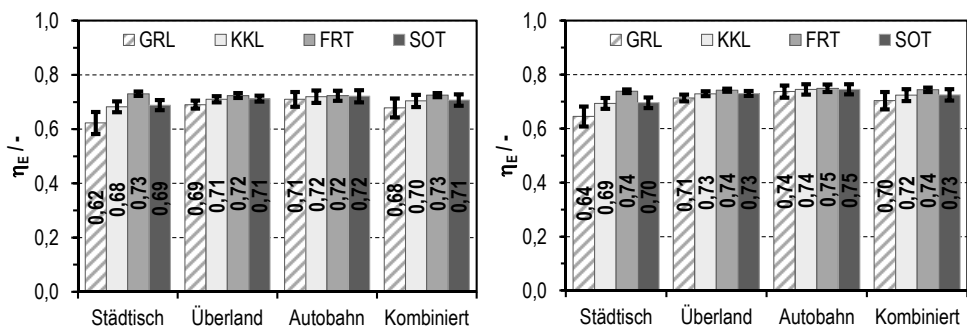
Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Weitere Informationen zur Darstellung, siehe Bild 6-19.



Die mittleren energetischen Nutzungsgrade für das Szenario „Zukunft“ sind aus **Bild 6-23** ersichtlich. Die Werte steigen geringfügig, wobei auch hier der Anstieg in der Fahrzyklengruppe „Städtisch“ am höchsten ist.

Bild 6-23: Mittlere energetische Nutzungsgrade von BEV im Szenario „Zukunft“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Weitere Informationen zur Darstellung, siehe Bild 6-19.



Abschließend enthält **Tab. 6-7** die Bereiche der Verbrauchswerte und die Angaben für die Fahrzyklen WLTC und MVEG sowie für deren Teilzyklen.

Tab. 6-7: Verbrauchswerte von BEV für unterschiedliche Fahrzyklen und Bordnetzlastfälle.

Erste Zeile: Wertebereich für Verbrauchsberechnungen bezogen auf alle 25 Fahrzyklen (keine Mittelwerte);

zweite Zeile: ECE | EUDC | MVEG;

dritte Zeile: WLTC-Low | WLTC-Middle | WLTC-High | WLTC-Very high.

Angaben in $kWh_e (100km)^{-1}$.

$[kWh_e (100km)^{-1}]$	A-Segment		C-Segment	
Pkw-Topologie	„Standard“	„Zukunft“	„Standard“	„Zukunft“
„Nur Grundlast“ (GRL)	10 – 18	8 – 15	12–21	9 – 17
	11 13 12	9 10 10	12 14 14	10 12 11
	11 10 12 13	8 8 10 11	12 12 14 15	9 9 11 12
„Frosttag“ (FRT)	14 – 30	12 – 25	16 – 34	13 – 28
	23 15 18	19 13 15	26 17 20	21 14 17
	23 15 15 17	19 12 12 14	26 17 17 19	21 13 14 16
„Keine Klimatisierung“ (KKL)	12 – 19	10 – 17	14 – 22	11 – 18
	15 14 14	13 12 12	17 16 16	14 13 13
	15 12 14 15	13 10 11 13	17 14 15 17	14 11 12 14
„Sommertag“ (SOT)	13 – 22	10 – 17	15 – 24	11 – 18
	17 15 16	13 12 12	19 16 17	14 13 13
	17 13 14 16	14 10 11 13	20 15 16 18	14 11 12 14

6.2.4 Brennstoffzellen-Pkw – FCV

Die Simulationsergebnisse für Elektro-Pkw mit Brennstoffzelle ergeben mittlere Verbrauchswerte zwischen $82 MJ (100km)^{-1}$ und $162 MJ (100km)^{-1}$ im A-Segment sowie zwischen $97 MJ (100km)^{-1}$ und $181 MJ (100km)^{-1}$ im C-Segment (siehe **Bild 6-24**).

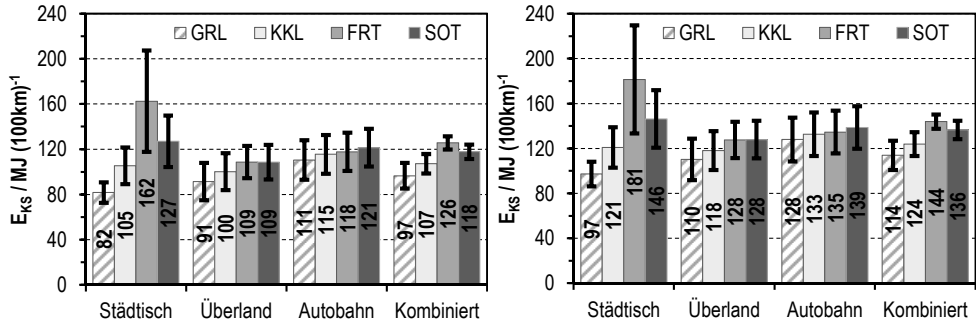
Die genannten Werte entsprechen Wasserstoffverbrauchsdaten, die im Mittel zwischen $0,7 kg_{H_2} (100km)^{-1}$ und $1,4 kg_{H_2} (100km)^{-1}$ im A-Segment sowie zwischen $0,8 kg_{H_2} (100km)^{-1}$ und $1,5 kg_{H_2} (100km)^{-1}$ im C-Segment liegen. Zur Umrechnung wurden $120 MJ kg^{-1}$ als unterer Heizwert angesetzt. In analoger Weise zu PAH und BEV gilt, dass höchster und niedrigster mittlerer Verbrauch in der Fahrzyklengruppe „Städtisch“ liegen. Die Variationskoeffizienten sind ebenfalls in der Fahrzyklengruppe „Städtisch“ mit Werten von 33 % und 31 % im A- beziehungsweise C-Segment am höchsten. In den anderen Gruppen liegen die Werte zwischen 11 % und 16 %. Der direkte Vergleich der Angaben für FCV mit denen für ICV, PAH und BEV zeigt, dass Verbrauchsdaten von FCV deutlich kleiner sind als die für ICV und PAH ermittelten Werte, jedoch größer als die für BEV.

Bild 6-24: Mittlere Kraftstoffverbrauchswerte von FCV im Szenario „Standard“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment.

Werte für Bordnetzlast- und Klimatisierungsfälle laut Tab. 6-1. Fehlerindikatoren geben die Standardabweichungen innerhalb der Fahrzyklengruppen an.

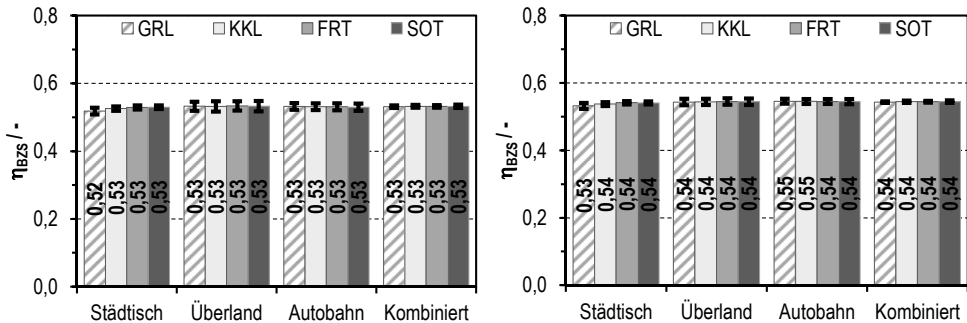
FCV: Brennstoffzellen-Pkw; FRT: „Frosttag“; GRL: „Nur Grundlast“; KKL: „Keine Klimatisierung“; SOT: „Sommertag“.



Die mittleren Wirkungsgrade der Elektromaschine im Motor- und Generatorbetrieb sind auf gleichem Niveau wie bei BEV (siehe Unterabschnitt 6.2.3) und werden daher hier nicht gezeigt.

Bild 6-25: Mittlere elektrische Wirkungsgrade des Brennstoffzellensystems bei FCV im Szenario „Standard“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Weitere Informationen zur Darstellung, siehe Bild 6-24.



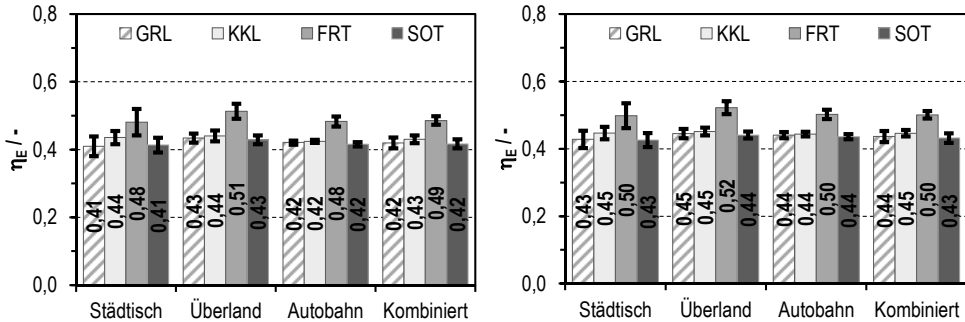
In **Bild 6-25** sind die mittleren elektrischen Wirkungsgrade des Brennstoffzellensystems (BZS) dargestellt. Werte für städtische Fahrzyklen sind geringfügig niedriger als für die anderen Fahrzyklengruppen. Auch die Standardabweichungen sind sehr gering. Der Einfluss unterschiedlicher Lastfälle sowohl die Fahrzyklen als auch die Bordnetzleistungen betreffend, ist demnach sehr gering. Der hier nicht dargestellte elektrische Wirkungsgradverlauf des Brennstoffzellensystems in Abhängigkeit der Systemleistung weist im Szenario „Standard“ im – auf den Wert eins normierten – Leistungsbereich zwischen 0,02 und 0,52 einen Systemwirkungsgrad von mehr als 50 % auf und erreicht sein Maximum von 55 % bei einer relativen Nettosystemleistung von 7 %. Die optimierende Laststeuerung ist demnach in der Lage den mittleren Wirkungsgrad in einem Bereich nahe dem Maximum zu halten. Der

geringste Systemwirkungsgrad wurde in der Fahrzyklengruppe „Städtisch“ für den Lastfall GRL ermittelt.

Die in **Bild 6-26** abgebildeten mittleren energetischen Nutzungsgrade zeigen ein ähnliches Verhalten wie es auch für PAH und BEV ermittelt wurde. Bei Nutzung von Abwärme zur Beheizung der Kabine im Lastfall FRT werden die höchsten Nutzungsgrade erzielt.

Bild 6-26: Mittlere energetische Nutzungsgrade von FCV im Szenario „Standard“.

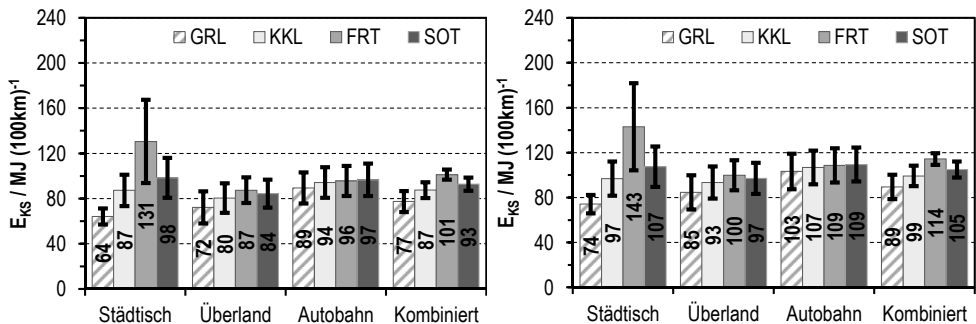
Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Weitere Informationen zur Darstellung, siehe Bild 6-24.



Im Szenario „Zukunft“ sind, wie **Bild 6-27** zu entnehmen ist, deutliche Reduktionen der Verbrauchswerte erkennbar. Die Angaben sind um 17 % bis 27 % geringer gegenüber den Werten für das Szenario „Standard“. Im Unterschied zu PAH und BEV weichen die Reduktion in den Fahrzyklengruppen nur geringfügig voneinander ab. Die energetischen Nutzungsgrade sind ähnlich zu denen des Szenarios „Standard“.

Bild 6-27: Mittlere Kraftstoffverbrauchswerte von FCV im Szenario „Zukunft“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Weitere Informationen zur Darstellung, siehe Bild 6-24.



Die Verbrauchsbereiche für alle durchgeführten Simulationsrechnungen zu FCV sind **Tab. 6-8** zu entnehmen. Zusätzlich sind dort die Verbrauchswerte in den Fahrzyklen MVEG und WLTC sowie deren Teilzyklen aufgeführt.

Tab. 6-8: Verbrauchswerte von FCV für unterschiedliche Fahrzyklen und Bordnetzlastfälle.

Erste Zeile: Wertebereich für Verbrauchsberechnungen bezogen auf alle 25 Fahrzyklen (keine Mittelwerte);

zweite Zeile: ECE | EUDC | MVEG;

dritte Zeile: WLTC-Low | WLTC-Middle | WLTC-High | WLTC-Very high.

Angaben in $kg_{H_2} (100km)^{-1}$ bei einem Heizwert von Wasserstoff von $120 MJ kg^{-1}$.

$kg_{H_2} (100km)^{-1}$	A-Segment		C-Segment	
Pkw-Topologie	„Standard“	„Zukunft“	„Standard“	„Zukunft“
„Nur Grundlast“ (GRL)	0,57 – 1,04	0,46 – 0,84	0,70 – 1,22	0,55 – 0,96
	0,66 0,73 0,71	0,52 0,58 0,56	0,78 0,89 0,84	0,59 0,69 0,65
	0,64 0,57	0,50 0,46	0,75 0,70	0,55 0,55
	0,67 0,75	0,54 0,61	0,82 0,88	0,63 0,69
„Frosttag“ (FRT)	0,74 – 2,10	0,60 – 1,72	0,84 – 2,30	0,68 – 1,84
	1,55 0,85 1,10	1,24 0,67 0,87	1,70 0,98 1,24	1,35 0,78 0,98
	1,55 0,84	1,25 0,69	1,70 0,95	1,35 0,74
	0,81 0,99	0,69 0,80	0,98 1,13	0,75 0,89
„Keine Klimatisierung“ (KKL)	0,69 – 1,13	0,57 – 0,93	0,80 – 1,26	0,63 – 1,03
	0,88 0,79 0,82	0,73 0,63 0,67	1,00 0,93 0,94	0,81 0,74 0,75
	0,87 0,69	0,73 0,57	0,99 0,80	0,80 0,63
	0,74 0,84	0,61 0,69	0,88 0,98	0,70 0,78
„Sommertag“ (SOT)	0,77 – 1,42	0,59 – 1,11	0,88 – 1,60	0,69 – 1,18
	1,10 0,84 0,94	0,85 0,65 0,73	1,26 1,00 1,09	0,91 0,77 0,82
	1,10 0,80	0,85 0,62	1,24 0,92	0,90 0,69
	0,83 0,93	0,65 0,73	0,97 1,06	0,73 0,82

6.3 Thermoelektrische Generatoren und Photovoltaikmodule

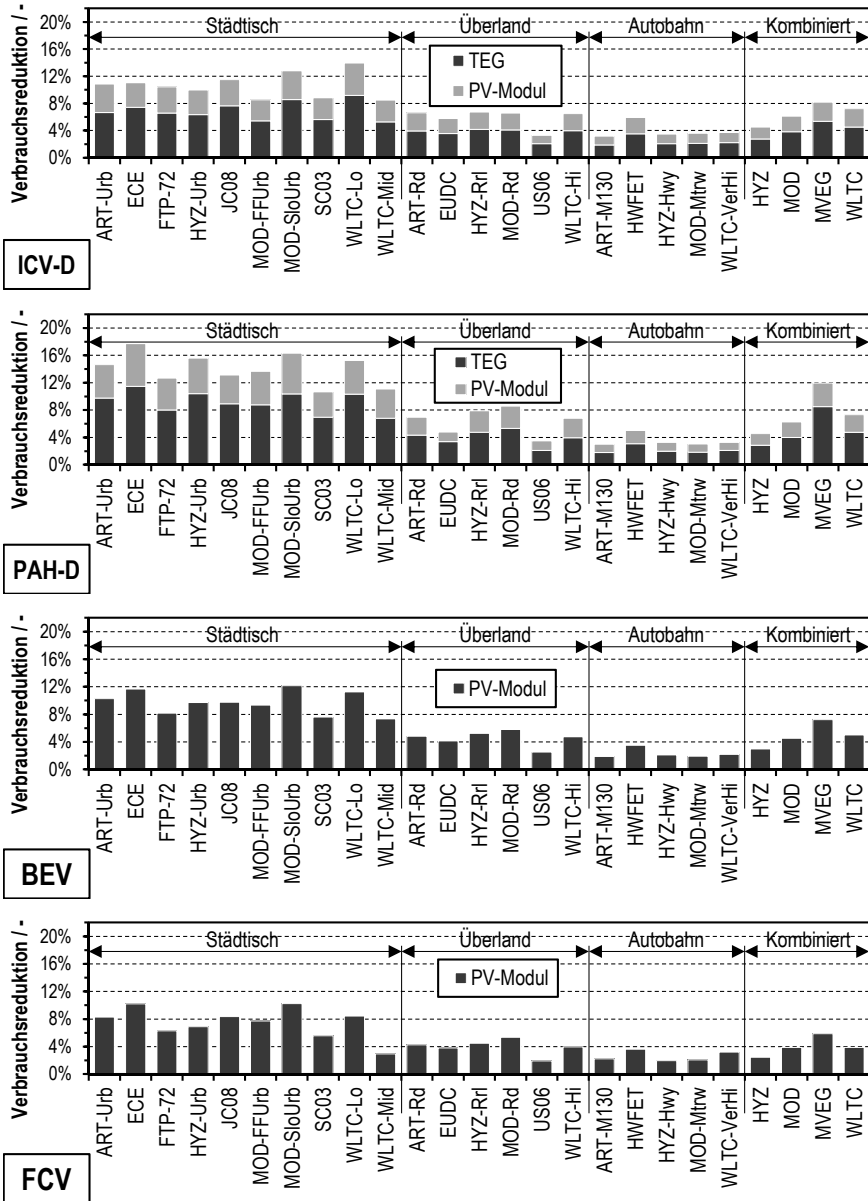
In separaten Rechnungen wurden die Auswirkungen der Nutzung von thermoelektrischen Generatoren (TEG) und Photovoltaikmodulen (PV-Modulen) betrachtet. Dazu wurden Berechnungen im Szenario „Zukunft“ für den Bordnetzlastfall „Sommertag“ (SOT) für die Konzepte PAH, BEV und FCV ausgewählt. Bei ICV wurde der Lastfall „Keine Klimatisierung“ verwendet, da der Fall SOT für dieses Konzept nicht betrachtet wurde. Die Ergebnisse aus diesen Berechnungen sind als Verbrauchsreduktion in **Bild 6-28** dargestellt. Als Grundwert der dargestellten Prozentangaben wurden die Verbrauchswerte ohne den Einsatz von TEG oder PV verwendet.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Verbrauchsreduktion am größten in städtischen Fahrzyklen ist und am geringsten für die Autobahnfahrzyklen ausfällt. Damit besteht auch hier eine Korrelation zwischen einer zeitkonstanten Leistung – in diesem Falle der Einspeiseleistung aus TEG beziehungsweise PV – und der durchschnittlichen Geschwindigkeit des Fahrzyklus.

Bild 6-28: Verbrauchsreduktion durch die Nutzung von thermoelektrischen Generatoren und Photovoltaikmodulen.

ICV im Lastfall „Keine Klimatisierung“, alle anderen im Lastfall „Sommertag“. Definitionen dazu siehe Tab. 6-1 und Tab. 3-7. Für alle Darstellungen gilt das Szenario „Zukunft“. Bezugswert der Prozentangaben ist der Kraftstoffverbrauch ohne TEG und PV.

BEV: Batterie-Pkw; **FCV:** Brennstoffzellen-Pkw; **ICV-G:** Verbrennungsmotor-Pkw mit Ottomotor; **PAH-G:** Parallelhybrid-Pkw mit Ottomotor; **SOT:** „Sommertag“; **KKL:** „Keine Klimatisierung“; **PV:** Photovoltaik-Modul; **TEG:** thermoelektrischer Generator.



Bei ICV und PAH fällt auf, dass die Verbrauchsreduktion für TEG und PV unterschiedlich hoch ausfällt. Einerseits ist die Einspeiseleistung aus TEG mit 200 W_e im C-Segment

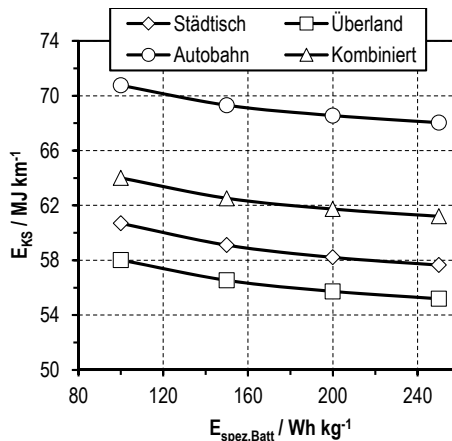
geringer als die Einspeisung aus PV mit $300 W_e$. Andererseits unterliegt die Einspeisung aus PV unter den hier getroffenen Annahmen weder Schwankungen noch Unterbrechung, während der Betrieb des TEG nur während des Betriebs des Verbrennungsmotors gegeben ist. Die dargestellten Werte sind daher auch als maximales Reduktionspotential zu betrachten, da bezogen auf PV eine konstant hohe Einspeisung aufgrund von Witterung, Sonnenstand und Abschattungen, beispielsweise durch Gebäude, nur selten gegeben ist. Hinsichtlich der Nutzung von TEG ist zu beachten, dass die zur Verfügung stehende Leistung mit der Motorleistung steigt. Insbesondere im Stadtverkehr dürften tatsächlich bereitgestellte Leistungen geringer ausfallen.

6.4 Spezifische Energie der Batterie bei BEV

In einer weiteren, separaten Rechnung wurde der Einfluss der spezifischen Energie der Batterie bei BEV untersucht. Die Verbrauchsbestimmung bezieht sich hierbei auf das Szenario „Standard“ und den Bordnetzlastfall „Keine Klimatisierung“. Die spezifische Energie wurde im Bereich von $100 Wh kg^{-1}$ bis $250 Wh kg^{-1}$ in Schritten von $50 Wh kg^{-1}$ variiert. Für jeden Wert wurden die Leistungsklassen der Antriebskomponenten entsprechend dem in Abschnitt 5.4 beschriebenen Vorgehen neu bestimmt und nachfolgend die Simulationen zur Verbrauchsbestimmung durchgeführt.

Bild 6-29: Einfluss der spezifischen Energie der Batterie auf den Kraftstoffverbrauch von BEV.

Werte für BEV des C-Segments im Szenario „Standard“ für den Bordnetzlastfall „Keine Klimatisierung“. Die zugehörigen Fahrzeugmassen sind $1416 kg$ bei $100 Wh kg^{-1}$, $1328 kg$ bei $150 Wh kg^{-1}$, $1284 kg$ bei $200 Wh kg^{-1}$, $1252 kg$ bei $250 Wh kg^{-1}$.



Die Darstellung in Bild 6-29 macht deutlich, dass trotz der deutlichen Differenz der Pkw-Masse von etwa $160 kg$ über den gesamten Bereich, der Verbrauch nur moderat abnimmt. Für die hier betrachtete Reichweitenvorgabe von $150 km$ ist demnach der Einfluss der spezifischen Energie gering.

6.5 Bewertung der Ergebnisse

In den Unterabschnitten 6.2.1 bis 6.2.4 wurden die Ergebnisse der Verbrauchsberechnungen als Mittelwerte der Fahrzyklengruppen und als Einzelwerte für die Fahrzyklen MVEG und WLTC jeweils mit deren Teilzyklen für jeden Bordnetzlastfall dargestellt. Wegen des beobachteten starken Einflusses der Bordnetzlast auf den Verbrauch, insbesondere bei den stärker elektrifizierten Konzepten PAH, BEV und FCV stellt sich die Frage nach – mit Bezug auf alltagstypische Fahrprofile – möglichst realitätsnahen Verbrauchsangaben. Der Lastfall „Nur Grundlast“ (GRL) wird aufgrund der in diesem Falle abgeschalteten nicht-betriebsnotwendigen Bordnetzverbraucher als nicht realistisch angesehen. Als sinnvoll erachtete Verbrauchsangaben beziehen sich daher auf die Bordnetzlastfälle „Keine Klimatisierung“ (KKL), „Sommertag“ (SOT), und „Frosttag“ (FRT).

Bild 6-30 enthält als Ergebnis der Bestimmung des Potentials zur Verbrauchsreduktion eine Übersicht der errechneten Reduktionspotentiale aller hier untersuchten Pkw-Konzepte im Szenario „Zukunft“ im Vergleich zu ICV mit Ottomotor (ICV-G) für das Szenario „Standard“. Auch für diese Darstellung sind die Mittelwerte der Fahrzyklengruppen gewählt worden. Eine fahrzyklusspezifische Analyse ist auf Basis der Einzelwerte im Anhang K möglich. Für PAH, BEV und FCV werden damit die Reduktionspotentiale durch Änderung des Antriebskonzepts mit denen durch Verbesserung der Fahrzeugparameter und Komponentenwirkungsgrade kombiniert. Die entsprechenden Werte in Relation zu ICV mit Dieselmotor (ICV-G) sind ebenfalls im Anhang K zu finden.

Die Darstellungen in **Bild 6-30** zeigen, dass BEV mit Werten zwischen 70 % und 79 % – wie eingangs erwähnt, wird der Lastfall GRL ausgenommen – die höchsten Reduktionspotentiale aufweisen. Für FCV wurden 42 % bis 60 % ermittelt und für PAH 19 % bis 48 %. Bezogen auf die Lastfälle wurden jeweils geringere Reduktionspotentiale für den Lastfall FRT ermittelt, was mit der hohen Abwärmenutzung bei ICV zusammenhängt. Die Optimierung von Fahrzeugparametern und Komponentenwirkungsgraden führt bei ICV zu Verbrauchsreduktionen zwischen 8 % und 12 %. Für den Vergleich auf Basis von ICV mit Dieselmotor gelten etwas geringere Verbrauchsreduktionspotentiale für BEV und FCV aufgrund der höheren Effizienz des Dieselmotors. Die diesbezüglichen Darstellungen sind Anhang M zu entnehmen.

Aus den Ergebnissen der Unterabschnitte 6.2.1 bis 6.2.4 und der Darstellung in **Bild 6-30** werden die folgenden Schlussfolgerungen gezogen:

- das Verbrauchsreduktionspotential von Pkw im Szenario „Zukunft“ gegenüber Pkw mit Verbrennungsmotor im Szenario „Standard“ (ICV) ist für Batterie-Pkw (BEV) am größten, gefolgt von Brennstoffzellen-Pkw (FCV) und Parallelhybrid-Pkw (PAH),
- hinsichtlich der Bordnetzlastfälle ist das Reduktionspotential von BEV, FCV und PAH für den Fall „Frosttag“ aufgrund der dabei hohen Abwärmenutzung des ICV am geringsten,
- zusätzliche Bordnetzleistungen wirken sich in Fahrzyklen mit geringer Durchschnittsgeschwindigkeit besonders stark verbrauchssteigernd aus und

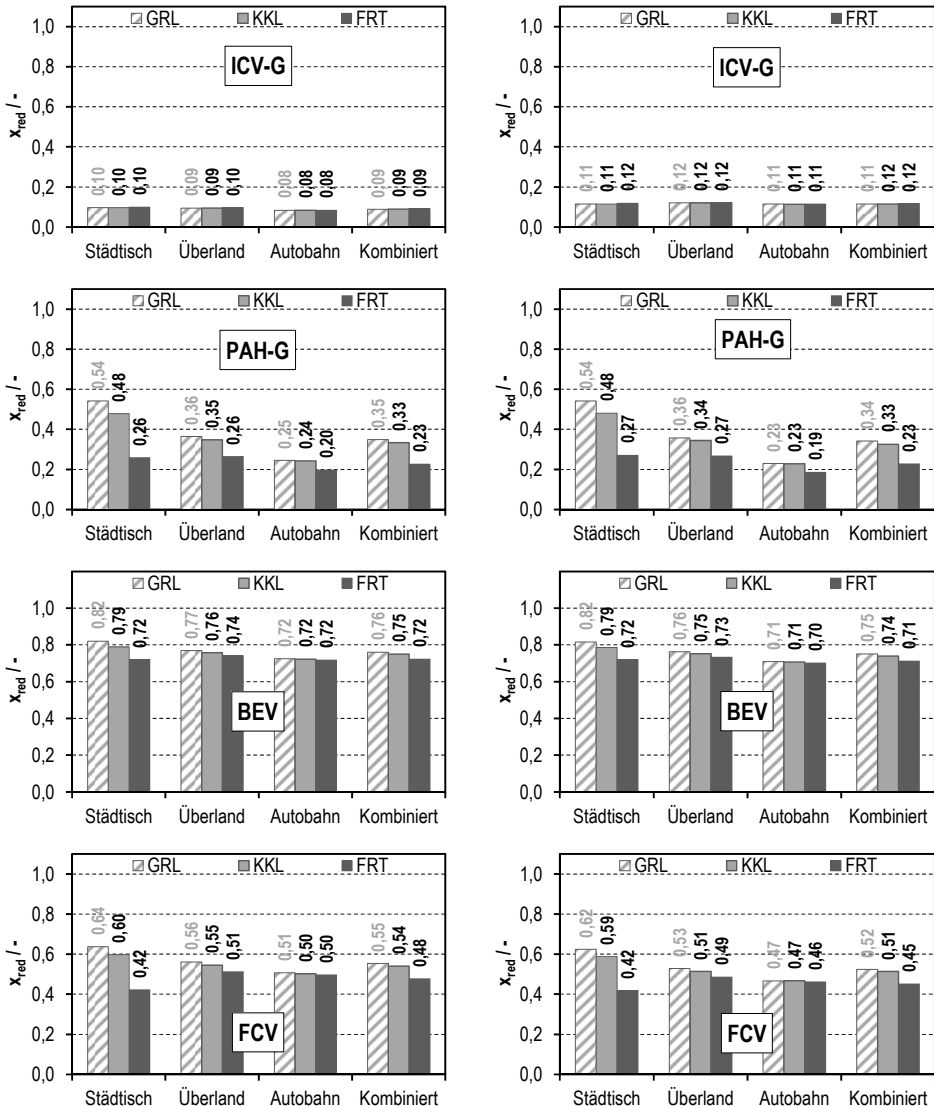
- die Variationskoeffizienten der Gesamtheit der Verbrauchswerte je Konzept, also bezogen auf alle Fahrzyklen und Bordnetzlastfälle, sind mit $23 \% \pm 2 \%$ für PAH, FCV und BEV am höchsten und mit $18 \% \pm 2 \%$ für ICV am geringsten.

Bild 6-30: Mittlere Verbrauchsreduktionspotentiale von ICV-G, PAH-G, BEV und FCV im Szenario „Zukunft“ gegenüber ICV-G im Szenario „Standard“.

Links: A-Segment; **rechts:** C-Segment. Werte für Bordnetzlast- und Klimatisierungsfälle laut Tab. 6-1.

BEV: Batterie-Pkw; **FCV:** Brennstoffzellen-Pkw; **ICV-G:** Verbrennungsmotor-Pkw mit Ottomotor;

PAH-G: Parallelhybrid-Pkw mit Ottomotor; **FRT:** „Frosttag“; **GRL:** „Nur Grundlast“; **KKL:** „Keine Klimatisierung“.



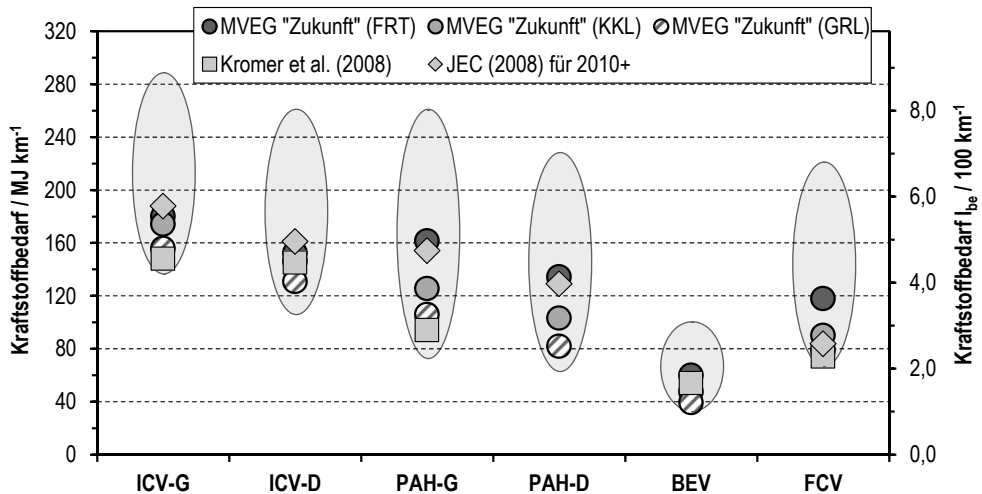
Wie zuvor bereits erwähnt, ist eine Validierung der Ergebnisse der Verbrauchsberechnungen im Rahmen dieser Arbeit nicht möglich. Mit dem Ziel einer besseren Einordnung der Berech-

nungen ermöglicht **Bild 6-31** den Vergleich ausgewählter Ergebnisse mit Angaben von Kromer et al. (2008) [15] und JEC (2008) [11].

Bild 6-31: Ergebnisse simulationsgestützter Kraftstoffverbrauchsanalysen für unterschiedliche Pkw-Konzepte.

Wertebereiche der Verbrauchsberechnungen in dieser Arbeit laut Tab. 6-5 bis Tab. 6-8 sind als Ellipsen für Pkw des C-Segments im Szenario „Zukunft“ dargestellt. Einzelwerte für die Fahrzyklen MVEG sind für die Bordnetzlastfälle KKL und FRT (Definitionen siehe Tab. 6-1) angegeben.

Literaturwerte laut JEC (2008) [11] für die Konfiguration „2010+“ und Kromer et al. (2008) [15] für den Zeithorizont 2030.



Aufgrund unterschiedlich gewählter Randbedingungen sind die in **Bild 6-31** verwendeten Literaturangaben untereinander sowie mit den Ergebnissen dieser Arbeit nur eingeschränkt vergleichbar. In beiden Fällen wurde zwar das Simulationswerkzeug ADVISOR verwendet (siehe Abschnitt 2.2). Die Werte laut [15] gelten jedoch für den „Combined, Adjusted“ Fahrzyklus bestehend aus US FTP und HWFET, die in der vorliegenden Arbeit als separate Fahrzyklen verwendet wurden, nicht jedoch in der kombinierten Form. Weiterhin wurde in [15] die Bordnetzlast nicht angegeben. Die Berechnungsergebnisse in JEC (2009) [11] gelten für den MVEG Fahrzyklus und eine konstante Bordnetzlast von 300 W_e, die etwas geringer als die hier verwendeten Grundlasten im Bordnetz ist. Darüber hinaus gelten studienspezifische Annahmen bezüglich der Fahrzeugparameter und Komponentenwirkungsgrade, die von den in dieser Arbeit verwendeten abweichen. Unter der Annahme, dass auch in [15] eine konstante Bordnetzlast verwendet wurde, ergibt sich die beste Vergleichbarkeit zu den in dieser Arbeit für den Fahrzyklus MVEG und den Lastfall GRL ermittelten Verbrauchswerten, die als schraffierte Kreise in **Bild 6-31** dargestellt sind.

Gegenüber ICV laut [15] wurden in dieser Arbeit geringfügig höhere Werte im Falle des ICV-G beziehungsweise niedrigere Werte im Falle des ICV-D ermittelt. Die diesbezüglichen Angaben in [11] liegen leicht oberhalb der Ergebnisse dieser Arbeit. Im Falle PAH wurden in der vorliegenden Arbeit leicht erhöhte Werte (PAH-G) gegenüber [15] ermittelt. Für PAH-G

und PAH-D gelten im Vergleich zu den, auf den Zeitraum „2010+“ bezogenen Werten laut [11] deutlich geringere Verbrauchswerte in dieser Arbeit. Hier wirken sich Annahmen bezüglich verbesserter Fahrzeugparameter und Komponentenwirkungsgrade für das Szenario „Zukunft“ aus. Bei BEV wurden im Vergleich zu [15] deutlich reduzierte Verbrauchswerte ermittelt. Ursache dafür ist der geringere mechanische Energiebedarf am Rad des Pkw, besonders aufgrund einer deutlich geringeren Fahrzeugmasse von 1193 kg gegenüber 1620 kg laut [15]. Für FCV wurden Werte mit guter Übereinstimmung ermittelt. Der in dieser Arbeit ermittelte Verbrauchswert ist in **Bild 6-31** nicht erkennbar, da er mit $81\text{ MJ (100km)}^{-1}$ annähernd dem Ergebnis von $81\text{ MJ (100km)}^{-1}$ laut [11] entspricht und grafisch durch diesen verdeckt wird. Auch für FCV hätten aufgrund der für das Szenario „Zukunft“ getroffenen Annahmen niedrigere Werte im Vergleich zu [11] erwartet werden können. Mögliche Ursachen dafür, dass die Werte in etwa gleich sind, könnten in unterschiedlichen Bordnetzlasten begründet liegen. In [11] wurde im Unterschied zu dieser Arbeit für das Brennstoffzellensystem ein höherer Systemwirkungsgrad ermittelt, der maximal Werte bis nahe 60 % gegenüber maximal 55 % in dieser Arbeit erreicht. Andererseits ist die Fahrzeugmasse mit 1470 kg etwa 170 kg höher als das FCV in dieser Arbeit. Eine detaillierter Vergleich der Literaturwerte mit den in dieser Arbeit ermittelten Verbrauchsangaben ist aufgrund der nicht zur Verfügung stehenden detaillierten Simulationsdaten nicht möglich.

Bild 6-31 macht weiterhin deutlich, dass Verbrauchswerte für den Fahrzyklus MVEG aus der Fahrzyklengruppe „Kombiniert“ im mittleren bis unteren Bereich der insgesamt ermittelten Werte liegen – mit der bereits erwähnten stärkeren Spreizung der Werte für PAH, BEV und FCV im Vergleich zu ICV. Der Bereich hoher Verbrauchswerte in **Bild 6-31** wird durch Verbrauchswerte in städtischen Fahrzyklen und dabei besonders in den Lastfällen mit hohem Strombedarf aufgespannt.

6.6 Fazit

In Kapitel 6 wurden die Verbrauchsreduktionspotentiale für jedes der untersuchten Pkw-Konzepte für unterschiedliche Bordnetzlastfälle ermittelt. Dazu wurde einführend eine Untersuchungsmatrix definiert, die abhängig vom zu analysierenden Konzept sowie vom Bordnetzlastfall die Verbrauchsberechnungen festlegt. Darüber hinaus wurden zur Beschreibung möglicher Entwicklungsfortschritte bei Fahrzeugparametern und Komponentenwirkungsgraden die zwei Szenarien „Standard“ und „Zukunft“ definiert. Mithilfe der im Rahmen der Arbeit erstellten Simulationsmodelle wurden die Verbrauchsberechnungen laut der Untersuchungsmatrix für beide Szenarien durchgeführt. Die Dokumentation der Ergebnisse erfolgte aufgrund des Datenumfanges der Ergebnisse anhand von Mittelwerten in den Fahrzyklengruppen „Städtisch“, „Überland“, „Autobahn“ und „Kombiniert“. Zur Diskussion wurden Verbrauchswerte, Komponentenwirkungsgrade und Energetische Nutzungsgrade verwendet. Als Schlussfolgerungen aus den Berechnungsergebnissen können folgende Aussagen getroffen werden:

- die Anwendung der Simulationsmodelle führte zu nachvollziehbaren Ergebnissen der Verbrauchsbestimmungen in Abhängigkeit von Konzept, Fahrzeugklasse und Bordnetzlastfall,
- in jedem der untersuchten Szenarien und Bordnetzlastfälle konnten Verbrauchsvorteile gegenüber Verbrennungsmotor-Pkw (ICV) festgestellt werden, die am höchsten für Batterie-Pkw (BEV) gefolgt von Brennstoffzellen-Pkw (FCV) und Parallelhybrid-Pkw (PAH) ausfallen,
- für den Bordnetzlastfall „Frosttag“ (FRT) ist das Reduktionspotential aufgrund der dabei möglichen Abwärmenutzung bei ICV am geringsten,
- Bordnetzlastfälle mit hoher Stromnutzung wirken sich bei PAH, BEV und FCV in besonderem Maße verbrauchssteigernd in städtischen Fahrzyklen aus,
- im Vergleich zu Daten aus der Literatur konnte der Einfluss der Bordnetzlast auf den Verbrauch deutlich differenzierter aufgezeigt und im Sinne der Aufgabenstellung ausgewertet werden.

Weiterhin wurde in separaten Rechnungen der Einfluss der Stromerzeugung mithilfe von thermoelektrischen Generatoren und von Photovoltaikmodulen untersucht. Hier konnte festgestellt werden, dass in städtischen Fahrzyklen konstante Einspeisungen in das Bordnetz zu Verbrauchsreduktionen von bis zur 18 % bei ICV und PAH führen können. Bei BEV und FCV liegen entsprechende Werte bei maximal 12 %. Diese Angaben gelten für idealisierte Bedingungen, so dass erwartet wird, dass realistische Werte deutlich darunter liegen.

Schließlich wurde auch der Einfluss der spezifischen Energie von Batterien bei BEV des C-Segments untersucht. Dabei konnte gezeigt werden, dass für die hier betrachtete Reichweitenvorgabe von 150 km eine Änderung dieses Parameters im Bereich von 100 Wh kg^{-1} bis 250 Wh kg^{-1} nur eine moderate Verbesserung des Kraftstoffverbrauchs von maximal 5 % bewirkt.

Insgesamt hat sich das in der vorliegenden Arbeit gewählte Vorgehen als geeignet erwiesen, Verbrauchsunterschiede, die in der Art und Weise der Nutzung von Pkw begründet liegen, für unterschiedliche Pkw-Konzepte quantitativ darzustellen und zu bewerten.

7 Zusammenfassung

Vor dem Hintergrund der aktuellen Treibhausgasproblematik sowie lokaler Luftschadstoff-situationen gelten zunehmend schärfere Anforderungen hinsichtlich der Energie- und Umweltbilanz von Fahrzeugantrieben. Maßnahmen zur Reduktion fahrzeuggebundener Energiebedarfe und Emissionen beziehen sich neben der Verringerung der Fahrwiderstände sowie der Optimierung von Verbrennungsmotoren vor allem auf das Energiemanagement bei zunehmender Nutzung elektrischer Leistung im Antrieb. Darüber hinaus sind auch Wasserstoff und Strom als Energieträger für Elektroantriebe in der Diskussion, so dass zunehmend Nutzungsmöglichkeiten für erneuerbare Energieträger in emissionsfreien Antrieben erschlossen werden können. Hinsichtlich der Ausstattung von Pkw sind Trends erkennbar bei denen durch erweiterte Komfort- und Sicherheitsfunktionen, verstärkt elektrische Energie im Bordnetz genutzt wird.

Ziel dieser Arbeit war es, in einem – gegenüber heute in der Literatur verfügbaren Analysen – erweiterten Bearbeitungsansatz, das Potential der Strombereitstellung und -nutzung in unterschiedlichen Pkw-Konzepten vergleichend zu bewerten. Zu den hier analysierten Konzepten zählen Pkw mit Verbrennungsmotor (ICV), Parallelhybride mit Verbrennungsmotor und Elektromaschine (PAH), Elektro-Pkw mit Batterie (BEV) sowie Elektro-Pkw mit Brennstoffzelle (FCV). Im Rahmen einer simulationsgestützten Kraftstoffverbrauchsanalyse wurden konzeptspezifische Simulationsmodelle entwickelt und eingesetzt, die auf dem Wege einer vereinheitlichten

- Gestaltung der Simulationsmodelle,
- Parametrierung der Komponenten, einschließlich der Leistungsklassifizierung der Antriebskomponenten,
- Spezifizierung der Lastprofile, sowie durch
- vergleichbare Verfahren der optimierenden Laststeuerung

miteinander in Bezug stehen. Einschränkungen, die bei BEV heute hinsichtlich der Fahrleistungsanforderungen Reichweite und Höchstgeschwindigkeit bestehen, wurden berücksichtigt.

Ausgangspunkt der Analyse waren die in Kapitel 3 definierten mechanischen, elektrischen und thermischen Lastprofile der Pkw-Nutzung. Mechanische Lastprofile am Rad des Fahrzeugs resultieren aus der Vorgabe zeitabhängiger Geschwindigkeitsverläufe auf der Basis von Fahrzyklen, wie sie in der Literatur verfügbar sind (Abschnitte 3.1 bis 3.4). Um hier eine über die Angabe von Normverbräuchen auf der Grundlage einzelner, gesetzgeberisch festgelegter Normfahrzyklen hinausgehende Breite an Ergebnissen zu erreichen, wurden für die Analyse insgesamt 25 Fahrzyklen verwendet. Diese Fahrprofile wurden städtischen, Überland-, Autobahn- und kombinierten Fahrzyklengruppen zugeordnet. Weiterhin wurden elektrische Lastprofile detailliert nach Verbrauchern heutiger Bordnetze und einschließlich deren Schaltcharakteristik festgelegt. Im Abschnitt 3.6 wurde das auf der Grundlage von

Literaturangaben erstellte, thermische Kabinenmodell erläutert, welches als integraler Bestandteil der Simulationsmodelle den zeitabhängigen Leistungsbedarf der Kabinenklimatechnik bestimmt. In diesem Zusammenhang wurden drei Klimatisierungsfälle für die durchzuführenden Simulationsrechnungen definiert.

Als Komponenten zur Bereitstellung mechanischer und elektrischer Leistungen wurden in den Abschnitten 3.7 und 3.8 Verbrennungsmotoren und Elektromaschinen sowie Batterien und Brennstoffzellensysteme bezüglich ihres Betriebsverhaltens beschrieben. Ergänzend sind als weitere Möglichkeiten der Strombereitstellung thermoelektrische Generatoren und Photovoltaikmodule für die im weiteren Verlauf definierten Szenarienrechnungen spezifiziert worden. Mit Rücksicht auf die Komplexität der Systeme sowie auf zu begrenzende Simulationszeiten wurde bezüglich der Gestaltung der Komponentenmodelle auf vereinfachte Kennfeld- und Kennlinienmodelle zurückgegriffen.

Als Ergebnis der Festlegungen in Kapitel 3 ließ sich feststellen, dass sowohl die fahrzyklusgebundenen, mechanischen Leistungsbedarfe als auch die thermischen und elektrischen Lastprofile je nach gewähltem Bordnetzlastfall sehr stark variieren. Mechanische Antriebsleistungen im Fahrzyklus liegen wegen der Maschinenauslegung auf der Grundlage heute üblicher Fahrleistungsanforderungen typischerweise im Bereich kleiner oder sehr kleiner Teillast. Darüber hinaus fallen auch die Beträge rekuperierbarer Energie je nach Fahrzyklus sehr unterschiedlich aus und sind in städtischen Fahrzyklen höher als in anderen Fahrzyklengruppen. Die in dieser Arbeit definierten thermischen und elektrischen Leistungen variieren zwischen einigen hundert Watt im Falle reiner Grundlast und mehreren Kilowatt, wenn weitere Verbraucher des 14 V-Bordnetzes sowie Heizelemente oder Klimakompressoren betrieben werden. Als Grenzfälle der Kabinenklimatechnik wurden

- mechanisch bereitzustellende 2,2 kW im Kühlfall und
- elektrisch oder aus Komponentenabwärme bereitzustellende 4,3 kW im Heizfall

für einen Pkw der Kompaktkwagenklasse ermittelt und anhand von Literaturdaten verifiziert.

In Vorbereitung der Erstellung der in dieser Arbeit entwickelten, analytischen Betriebsstrategien wurden in Kapitel 4 die topologiespezifischen Möglichkeiten der Verbrauchsoptimierung dargestellt und die daraus abgeleiteten Funktionsumfänge für jedes der untersuchten Konzepte festgelegt. Dazu gehören unter anderem Stopp-Startfunktion, Lastpunktverschiebung, -anhebung und -reduktion sowie batterieelektrisches Fahren und rekuperatives Bremsen. Als im Rahmen der verbrauchsoptimierenden Laststeuerung eingesetzte Bewertungsfunktionen wurden für PAH und FCV Kraftstoffnutzungsgrade unter Verwendung konzeptspezifischer Wirkungsgradketten elektrischer Batterielade- und Entladeleistungen festgelegt. Mit dem Ziel der Einhaltung des Betriebsbereichs der Batterie wurde darüber hinaus eine Eingriffsmöglichkeit der Ladezustandssteuerung in die Bewertungsfunktionen definiert.

In Kapitel 5 wurde die Umsetzung der Komponentenmodelle und Betriebsstrategien, sowie der Parameterdefinitionen und Berechnungsabläufe in eine geschlossene Modellumgebung erläutert. Solche Berechnungsabläufe betreffen unter anderem Skalierungsroutinen zur

Leistungsklassifizierung von Antriebskomponenten und die Steuerung der Simulationsdurchläufe zur Verbrauchsbestimmung. Im zweiten Teil des Kapitels wurde die Entwicklung der verbrauchsoptimierenden Laststeuerung beschrieben, die vereinfacht als ein Verfahren zur Bewertung optionaler Betriebszustände von Antriebskomponenten auf der Grundlage der oben genannten Analyse von Kraftstoffnutzungsgraden charakterisiert werden kann. Solche optionalen Betriebszustände werden im hier entwickelten Ansatz anhand geeigneter Diskretisierungen von Betriebsbereichen der Antriebsmaschinen für jede Gangstufe und in paralleler Rechnung bewertet. Als optimal identifizierte Betriebspunkte und Gangstufen werden dann als Sollwerte an Antriebsmaschinen beziehungsweise Getriebesteuerung ausgegeben.

In Kapitel 6 wurden schließlich die Randbedingungen der Potentialbestimmung festgelegt. Dazu wurden die zwei Szenarien „Standard“ und „Zukunft“ definiert, die sich in den getroffenen Annahmen bezüglich äußerer Fahrzeugparameter sowie des Wirkungsgradverhaltens von Antriebskomponenten voneinander unterscheiden. Weiterhin wurde eine Untersuchungsmatrix erstellt, die die Klimatisierungs- und Bordnetzlastfälle für jedes Konzept festlegt und die auf jedes der genannten Szenarien angewendet wurde. Die Simulationsergebnisse wurden als Mittelwerte der Fahrzyklengruppen dargestellt und diskutiert sowie anhand ausgewählter fahrzyklusbezogener Werte mithilfe von Literaturdaten bewertet.

Der Einsatz der hier entwickelten Modellumgebung hat gezeigt, dass auch große Berechnungsumfänge, wie sie bei der Potentialermittlung als Teil der Aufgabenstellung dieser Arbeit notwendig waren, mit einem als vertretbar angesehenen Zeitaufwand von wenigen Stunden je Verbrauchsbestimmung bearbeitet werden können. Die Vorgehensweise bei der Parametrierung der Modelle ist so gestaltet, dass Parametervariationen automatisiert durchgeführt werden können. Darüber hinaus können Betriebskennfelder und Kennlinien auf einfache Art und Weise ausgetauscht werden. Flexible Einsatzmöglichkeiten der Modellumgebung über den Zweck dieser Arbeit hinaus sind damit gegeben.

Wie die Simulationsergebnisse dieser Arbeit zeigen, ist das bei der Bearbeitung der Aufgabenstellung gewählte Vorgehen geeignet, nachvollziehbare Unterschiede in den Kraftstoffverbräuchen der untersuchten Pkw-Konzepte ausgehend von deren Topologie und Auslegung sowie von den gewählten Lastfällen des Bordnetzes aufzuzeigen. Im Vergleich der Konzepte konnten Verbrauchsreduktionspotentiale zukünftiger Pkw für realistische Bordnetzlastprofile jeweils gegenüber heutigen ICV mit Ottomotor für

- PAH mit Ottomotor mit 30 % bis 60 %,
- BEV mit 76 % bis 86 % und
- FCV mit 50 % bis 67 %

ermittelt werden. Dabei gelten höhere Reduktionspotentiale für niedrigere Bordnetzleistungen. Das geringste Reduktionspotential wurde für den Lastfall „Frosttag“ ermittelt, bei dem im Falle von ICV die Heizleistung nahezu vollständig von der Verbrennungsmotorabwärme gedeckt wird, während bei PAH, BEV und FCV zum Teil elektrisch beheizt werden muss. Weiterhin nimmt das Reduktionspotential in den Fahrzyklengruppen „Überland“,

„Autobahn“ und „Kombiniert“ gegenüber der Fahrzyklengruppe „Städtisch“ ab, da bei dann erhöhten Antriebsleistungen der mittlere Wirkungsgrad des Verbrennungsmotors bei ICV zunimmt. Darüber hinaus wirkt sich die Stromerzeugung zur Kabinenheizung weniger stark verbrauchssteigernd aus, da bei insgesamt deutlich wachsendem Energiedurchsatz und höherer mittlerer Geschwindigkeit der relative Anteil des Strombedarfs sinkt. In Relation zum heutigen ICV mit Dieselmotor führte die Untersuchung aufgrund dessen höherer Antriebs-effizienz zu leicht verringerten Reduktionspotentialen zukünftiger BEV und FCV.

Weiterhin wurde festgestellt, dass die Schwankungsbreite der Ergebnisse für unterschiedliche Lastfälle bei PAH, BEV und FCV besonders bei städtischen Fahrzyklen deutlich höher ist als bei ICV. Der Variationskoeffizient bezogen auf die Gesamtheit der Verbrauchsbestimmungen in dieser Fahrzyklengruppe beträgt bei ICV je nach Szenario und Fahrzeugklasse 10 % bis 11 % während bei PAH, BEV und FCV Werte zwischen 30 % und 37 % ermittelt wurden. Auch hier wirkt sich bei ICV das größere Abwärmeaufkommen aus, so dass zur Beheizung keine zusätzliche Leistung bereitgestellt werden muss. In den anderen Fahrzyklengruppen sind die Variationskoeffizienten bei insgesamt geringerem Niveau ebenfalls bei ICV am geringsten. Es gilt auch hier die Begründung des höheren Energiedurchsatzes bei höheren mittleren Geschwindigkeiten.

Darüber hinaus wurde mithilfe weiterer Simulationsrechnungen der Einsatz von thermoelektrischen Generatoren und PV-Modulen untersucht. Es konnte festgestellt werden, dass die Kombination beider Stromerzeugungstechniken unter Annahme idealisierter Randbedingungen zu einem Verbrauchsreduktionspotential von maximal 15 % führt.

Abschließend wurde am Beispiel des BEV der Einfluss der spezifischen Energie auf den Kraftstoffverbrauch analysiert. Es konnte gezeigt werden, dass bei der in dieser Arbeit zugrundegelegten Reichweitenvorgabe eine deutliche Erhöhung dieses Parameters von 100 Wh kg^{-1} auf 250 Wh kg^{-1} eine Verbrauchsreduktion von nur etwa 5 % bewirkt.

Der Vergleich der in dieser Arbeit ermittelten Verbrauchswerte mit Literaturwerten hat gezeigt, dass konzeptbezogene Verbrauchsunterschiede für einzelne Fahrzyklen in ähnlicher Weise ermittelt wurden. In der Literatur sind jedoch bei konzeptübergreifenden Analysen typischerweise nur Angaben für Basislastfälle mit konstanter Bordnetzlast verfügbar. Der Detaillierungsgrad der vorliegenden Dokumentation ist demgegenüber deutlich größer und erweitert damit das Spektrum an verfügbaren Daten zur Bewertung des Verbrauchsverhaltens von Pkw.

Bibliographie

- [1] *Eckpunkte für ein integriertes Energie- und Klimaprogramm*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Berlin, 2007.
- [2] *Energiekonzept für eine umweltschonende, zuverlässige und bezahlbare Energieversorgung*. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi), Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit (BMU): Berlin, 2010.
- [3] *Mobilität und Verkehrstechnologien – Das 3. Verkehrsforschungsprogramm der Bundesregierung*. Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie (BMWi): Berlin, 2008.
- [4] *Nationaler Entwicklungsplan Elektromobilität*. Bundesministerium für Bildung und Forschung: Bonn/ Berlin, 2009.
- [5] *Ideen. Innovation. Wachstum. Hightech-Strategie 2020 für Deutschland*, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Bonn/ Berlin, 2010.
- [6] Verordnung (EG) Nr. 715/2007 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 20. Juni 2007 über die Typgenehmigung von Kraftfahrzeugen hinsichtlich der Emissionen von leichten Personenkraftwagen und Nutzfahrzeugen (Euro 5 und Euro 6) und über den Zugang zu Reparatur- und Wartungsinformationen für Fahrzeuge.
- [7] ISERMANN, R.: *Mechatronische Systeme: Grundlagen*. Springer Berlin, Heidelberg, New York, 2008. ISBN 978-3-540-32336-5
- [8] KIRCHNER, E.: *Leistungsübertragung in Fahrzeuggetrieben*. Springer-Verlag: Berlin-Heidelberg, 2007.
- [9] *Competition Reports: Car prices within the European Union*. European Commission, Brüssel, 2011.
- [10] *Methodische Erläuterungen zu Statistiken über Fahrzeugzulassungen*. Kraftfahrtbundesamt, Flensburg, 2013.
- [11] *JEC - Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE collaboration: Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context - Tank-to-Wheels Report, Version 3.1, 2008*. European Commission, Joint Research Centre, 2008.
- [12] *JEC - Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE collaboration: Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context - Well-to-Tank Report, Version 3, 2008*. European Commission, Joint Research Centre, 2008.
- [13] *JEC - Joint Research Centre-EUCAR-CONCAWE collaboration: Well-to-Wheels Analysis of Future Automotive Fuels and Powertrains in the European Context - Well-to-Wheels Report, Version 2c*. European Commission, Joint Research Centre, 2007.

- [14] WIPKE, K.B., et al.: *ADVISOR 2.1: A User-Friendly Advanced Powertrain Simulator Using a Combined Backward/Forward Approach*. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 48 (1999), pp. 1751-1761.
- [15] KROMER, M.A.; HEYWOOD, J.B.: *A Comparative Assessment of Electric Propulsion Systems in the 2030 US Light-Duty Vehicle Fleet*. In *proceedings: SAE 2008 World Congress*, Detroit, USA, 2008.
- [16] WILLIAMSON, S.S.; EMADI, A.: *Comparative Assessment of Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles Based on Comprehensive Well-to-Wheels Efficiency Analysis*. In: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 54 (2005), pp. 856-862.
- [17] MOORE, R.M., et al.: *A dynamic simulation tool for hydrogen fuel cell vehicles*. In: *Journal of Power Sources* 141 (2005), pp. 272-285.
- [18] BROWN, D., et al.: *Drive-train simulator for a fuel cell hybrid vehicle*. In: *Journal of Power Sources* 183 (2008), pp. 275-281.
- [19] DELORME, A., et al.: *Evolution of Hydrogen Fueled Vehicles Compared to Conventional Vehicles from 2010 to 2045*. In *proceedings: SAE World Congress*, Detroit, April 2009.
- [20] ROUSSEAU, A., et al.: *Research on PHEV Battery Requirements and Evaluation of Early Prototypes*. In *proceedings: Proceedings of Advanced Automotive Battery Conferences (AABC)*, Long Beach, 16.-18. Mai 2007.
- [21] NELSON, P., et al.: *Advanced lithium-ion batteries for plug-in hybrid-electric vehicles*. In *proceedings: 23rd International Electric Vehicle Symposium (EVS23)*, Anaheim, CA, USA, Dezember 2007.
- [22] CAO, Q., et al.: *PHEV hymotion Prius model validation and control improvements*. In *proceedings: 23rd International Electric Vehicle Symposium (EVS23)*, Anaheim, CA, USA, Dezember 2007.
- [23] KIM, N.; ROUSSEAU, A.: *Assessment by Simulation of Benefits of New HEV Powertrain Configurations*. In *proceedings: International Scientific Conference on Hybrid and Electric Vehicles*, 6.-7. Dezember 2011, IFPEN, 2011.
- [24] SCHOUTEN, N.J., et al.: *Fuzzy Logic Control for Parallel Hybrid Vehicles*. In: *IEEE Transactions on Control Systems Technology* 10 (2002), pp. 460-468.
- [25] BIEDERMANN, P., et al. (Ed.) *Methanol as an energy carrier [E-Book]*. Jülich: Forschungszentrum, Zentralbibliothek, 2006. ISBN 978-3-89336-446-6
- [26] GRUBE, T.; STOLTEN, D.: *Bewertung von Fahrzeugkonzepten mit Brennstoffzellen und Batterien*. In *proceedings: Innovative Fahrzeugantriebe 2010*, Dresden, VDI Verlag GmbH Düsseldorf VDI-Berichte 2105, 2010.
- [27] GRUBE, T., et al.: *Assessment of the Application of Fuel Cell APUs and Starter-Generators to Reduce Automobile Fuel Consumption*. In: *Fuel Cells* 7 (2007), pp. 128–134.

- [28] CAMPANARI, S., et al.: *Energy analysis of electric vehicles using batteries or fuel cells through well-to-wheel driving cycle simulations*. In: *Journal of power sources* 186 (2009), pp. 464-477.
- [29] BÖCKL, M.: *Adaptives und prädiktives Energiemanagement zur Verbesserung der Effizienz von Hybridfahrzeugen*. Technische Universität Wien, Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Kraftfahrzeugbau, Dissertation. 2008
- [30] ISERMANN, R.: *Mechatronische Systeme: Grundlagen*. Springer-Verlag GmbH: Heidelberg, 1999. ISBN 978-3540647256
- [31] *Fahrzeug Konfigurator (Adam Opel AG)*. www.opel.de. Aktualisierungsdatum: 30.06.2011.2011.
- [32] *BMW Konfigurator*. www.bmw.de. Aktualisierungsdatum: 30.06.2011.2011. BMW AG.
- [33] *Mercedes-Benz Konfigurator*. www.mercedes-benz.de. Aktualisierungsdatum: 30.06.2011.
- [34] *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*. Vieweg + Teubner Verlag, Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH: Wiesbaden, 2011. ISBN 978-3-8348-1440-1
- [35] BRAESS, H.-H.; SEIFFERT, U. (Ed.) *Vieweg-Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Vieweg: Wiesbaden, 2003. ISBN 3-528-23114-9
- [36] MITSCHKE, M.; WALLENTOWITZ, H.: *Dynamik der Kraftfahrzeuge*. Springer Verlag: Berlin/ Heidelberg, 2004. ISBN 3-540-42011-8
- [37] WALLENTOWITZ, H.: *Längsdynamik von Kraftfahrzeugen: Verkehrssystem Kraftfahrzeug, Leistungs- und Energiebedarf, Antriebsstrang, Fahrzeugdynamik; Vorlesungsumdruck Kraftfahrzeuge I*. ika Institut für Kraftfahrwesen Aachen, RWTH Aachen: Aachen: Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen, 1997. ISBN 3-925194-35-5
- [38] Richtlinie des Rates vom 20. März 1970 zur Angleichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten über Maßnahmen gegen die Verunreinigung der Luft durch Emissionen von Kraftfahrzeugen (70/220/EWG) - konsolidierte Fassung vom 01.01.2007, Der Rat der Europäischen Gemeinschaften, Brüssel, 2006.
- [39] *National Institute of Standards and Technology (NIST)*. www.nist.gov. Aktualisierungsdatum: 09. April.2011.
- [40] NAUNHEIMER, H., et al.: *Fahrzeuggetriebe: Grundlagen, Auswahl, Auslegung und Konstruktion*. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2007. ISBN 978-3-540-30625-2
- [41] KNORR, R.: *Start/Stopp-Systeme auf der Zielgeraden*. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 113 (2011), pp. 664-669.
- [42] FEROLDI, D., et al.: *Energy Management Strategies based on efficiency map for Fuel Cell Hybrid Vehicles*. In: *Journal of power sources* 190 (2009), pp. 387-401.
- [43] AHLUWALIA, R.K.; WANG, X.: *Direct hydrogen fuel cell systems for hybrid vehicles*. In: *Journal of power sources* 139 (2005), pp. 152-164.

- [44] RODATZ, P.: *Dynamics of the Polymer Electrolyte Fuel Cell: Experiments and Model-based Analysis*. ETH Zürich, Dissertation. 2003
- [45] *Kraftfahrtechnisches Taschenbuch*. Vieweg: Wiesbaden, 2003. ISBN 3-528-23876-3
- [46] BÜCHNER, S.: *Energiemanagement-Strategien für elektrische Energiebordnetze in Kraftfahrzeugen*. Technische Universität Dresden, Fakultät für Verkehrswissenschaften "Friedrich List", Dissertation. 2008
- [47] *Kraftfahrzeug-Hybridantriebe - Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*. Vieweg + Teubner Verlag: Wiesbaden, 2012. ISBN 978-3-8348-0722-9
- [48] BRAESS, H.-H.; SEIFFERT, U. (Ed.) *Vieweg-Handbuch Kraftfahrzeugtechnik*. Vieweg+Teubner Verlag: Wiesbaden, 2011. ISBN 978-3-8348-1011-3
- [49] LUBISCHER, F., et al.: *Kraftstoffsparpotenzial durch Lenkung und Bremse*. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* (2008), pp. 996-1005.
- [50] KÖRNER, C.: *Wirkungsgradoptimiertes Offline- und Online-Energiemanagement bei einem seriellen Hybridantrieb*. Universität Ulm, Fakultät für Ingenieurwissenschaften, Dissertation. 2002
- [51] *Sparen beim Fahren - Stromerzeugung kostet Sprit*. <http://www.adac.de/>. Aktualisierungsdatum: 19.09.2013. ADAC e.V.
- [52] BITSCHKE, O.; GUTMANN, G.: *Systems for hybrid cars*. In: *Journal of power sources* 127 (2004), pp. 8-15.
- [53] FICKEL, F.: *E-Fahrzeuge, Auswirkungen auf die Elektronikentwicklung im Fahrzeug*. In *proceedings*: Zweiter Deutscher Elektro-Mobil Kongress, Bonn, 17.06.2010.
- [54] KARDEN, E., et al.: *Energy storage devices for future hybrid electric vehicles*. In: *Journal of Power Sources* 168 (2007), pp. 2-11.
- [55] JUNG, M., et al.: *Innenraumheizung von Hybrid- und Elektrofahrzeugen*. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 113 (2011), pp. 396-401.
- [56] HOFMANN, P.: *Hybridfahrzeuge - Ein alternatives Antriebskonzept für die Zukunft*. Springer Verlag: Wien, 2010. ISBN 978-3-211-89190-2
- [57] *PTC-Heizelemente für Elektro- und Hybridfahrzeuge*. Aktualisierungsdatum: 22.02.2012. J. Eberspächer GmbH & Co. KG.
- [58] BEETZ, K., et al.: *Beheizungskonzepte für Fahrzeuge mit Alternativen Antrieben*. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* (2010), pp. 246-249.
- [59] PUDENZ, K.: *Elektroautos ohne Einschränkung der Reichweite mit Bioethanol beheizen*. Aktualisierungsdatum: 22.02.2012. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- [60] *Wetterlexikon - Klimatologische Kenntage*. www.dwd.de. Aktualisierungsdatum: 26.03.2012. Deutscher Wetterdienst.

- [61] KONZ, M., et al.: *Spezifische Anforderungen an das Heiz-Klimasystem elektromotorisch angetriebener Fahrzeuge*. Forschungsvereinigung Automobiltechnik e.V. (FAT), FAT Schriftenreihe, Volume 233, Berlin, 2011.
- [62] GROßMANN, H.: *Pkw-Klimatisierung - Physikalische Grundlagen und technische Umsetzung*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2010. ISBN 978-3-642-05494-5
- [63] *VDI Wärmeatlas*. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 2006. ISBN 978-3-540-25504-8
- [64] GOSSEN, F.: *Brennstoffzellenfahrzeuge im Vergleich zu weiterentwickelten konventionell angetriebenen Fahrzeugen*. RWTH Aachen, Fakultät für Maschinenwesen, Dissertation. 2000
- [65] RHODE-BRANDENBURGER, K.: *Verfahren zur einfachen und sicheren Abschätzung von Kraftstoffverbrauchspotentialen*. In *proceedings*, Haus der Technik Essen, Haus der Technik Essen e.V., 1996.
- [66] MERDES, N., et al.: *Die neuen R4-Ottomotoren M270 mit Turboaufladung*. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* ATZ-extra September 2012 (2012), pp. 58-63.
- [67] SCHOMMERS, J., et al.: *Der Vierzylinder Dieselmotor OM651 - Einer für alle*. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* ATZ-extra September 2012 (2012), pp. 64-67.
- [68] *Elektrofahrzeuge: Bedeutung, Stand der Technik, Handlungsbedarf - Gesamttext*. VDE Verband der Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik e.V., 2010.
- [69] LI, X.; WILLIAMSON, S.S.: *Efficiency Analysis of Hybrid Electric Vehicle (HEV) Traction Motor-inverter Drive for Varied Driving Load Demands*. In *proceedings: Applied Power Electronics Conference and Exposition*, 2008. APEC 2008. Twenty-Third Annual IEEE, 24-28 Feb. 2008, ISBN 1048-2334, 2008.
- [70] Im Rahmen einer Forschungs Kooperation verwendete, unveröffentlichte Kennfelddaten einer Elektromaschine für einen Pkw-Antrieb, Forschungszentrum Jülich GmbH, 2001.
- [71] Das DSG-Doppelkupplungsgetriebe - Umweltprädikat, Volkswagen AG, Wolfsburg, 2008.
- [72] *GETRAG Powershift(R) 6DCT150*. www.getrag.com. Aktualisierungsdatum: 03.12.2013. GETRAG Getriebe- und Zahnradfabrik Hermann Hagenmeyer GmbH & Cie KG.
- [73] *GETRAG Powershift(R) 7DCT300*. www.getrag.com. Aktualisierungsdatum: 03.12.2013. GETRAG Getriebe- und Zahnradfabrik Hermann Hagenmeyer GmbH & Cie KG.
- [74] *GETRAG Powershift(R) 6DCT250*. www.getrag.com. Aktualisierungsdatum: 03.12.2013. GETRAG Getriebe- und Zahnradfabrik Hermann Hagenmeyer GmbH & Cie KG.
- [75] DIEGELMANN, C.B.: *Potenzial einer SOFC-APU bei der Verbrauchsoptimierung von Kraftfahrzeugen*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Energiewirtschaft und Anwendungstechnik, Dissertation. 2008

- [76] JOSSEN, A.; WEYDANZ, W.: *Moderne Akkumulatoren richtig einsetzen*. printyourbook - Inge Reichardt Verlag: Untermeitingen, 2006. ISBN 3-939359-11-4
- [77] MACDONALD, D.D.; SCHMUKI, P. (Ed.) *Encyclopedia of electrochemistry, Volume 5: Electrochemical engineering*. Wiley-VCH: Weinheim, 2007. ISBN 978-3-527-30379-7
- [78] WALLENTOWITZ, H.; REIF, K. (Ed.) *Handbuch Kraftfahrzeugelektronik: Grundlagen, Komponenten, Systeme, Anwendungen*. Vieweg+Teubner: Wiesbaden, 2006. ISBN 978-3-528-03971-4
- [79] *40 Jahre Elektromobilität bei der BMW Group. Vom BMW 1602 zum BMW i3.* www.press.bmwgroup.com. Aktualisierungsdatum: 06.08.2013. BMW Group Konzernkommunikation und Politik.
- [80] WILHELM, J.: *Hybridisierung und Regelung eines mobilen Direktmethanol-Brennstoffzellen-Systems*. RWTH Aachen University, Dissertation. 2010
- [81] SPOTNITZ, R.: *Simulation of capacity fade in lithium-ion batteries*. In: *Journal of Power Sources* 113 (2003), pp. 72-80.
- [82] RAUH, A., et al.: *Modellgestützter Beobachterentwurf zur Betriebszustandserkennung für Lithium-Ionen-Batterien*. In *proceedings: Innovative Fahrzeugantriebe 2010*, Dresden, VDI Verlag GmbH Düsseldorf VDI-Berichte 2105, 2010.
- [83] CHEN, M.; GABRIEL, A.R.-M.: *Accurate Electrical Battery Model Capable of Predicting Runtime and I-V Performance*. In: *IEEE Transactions on Energy Conversion* 21 (2006), pp. 504-511.
- [84] ERDINC, O., et al.: *A dynamic lithium-ion battery model considering the effects of temperature and capacity fading*. In *proceedings: International Conference on Clean Electrical Power*, Capri, Italien, 7.-9. Juni 2009, IEEE, 2009.
- [85] GAO, L., et al.: *Dynamic Lithium-Ion Battery Model for System Simulation*. In: *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies* 25 (2002), pp. 495-505.
- [86] *Dubbel [E-Book]: Taschenbuch für den Maschinenbau*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. ISBN 9783642173066
- [87] *Multi-year research, development and demonstration plan, Hydrogen, fuel cells & infrastructure technologies program - Chapter 3.3 Hydrogen Storage, 2011 Interim Update*. Department of Energy, USA, 2011.
- [88] *High Pressure Lightweight Type IV H2 Cylinders – 129L*. <http://www.qtw.com/129L-tank>. Aktualisierungsdatum: 30.04.2013. Quantum Fuel Systems Technologies Worldwide Inc.
- [89] GAO, L., et al.: *An actively controlled fuel cell/battery hybrid to meet pulsed power demands*. In: *Journal of power sources* 130 (2004), pp. 202-207.
- [90] REDDIG, M., *Gleichspannungswandler (Gleichstromsteller)*. Leistungselektronische Schaltungen, Springer Berlin Heidelberg, 2008, pp. 437-525. ISBN 978-3-540-69300-0

- [91] MICHEL, M., *GS-Umrichter*. Leistungselektronik, Springer Berlin Heidelberg, 2011, pp. 237-261. ISBN 978-3-642-15983-1
- [92] STAUNTON, R.H., et al.: *Evaluation of 2004 Toyota Prius Hybrid Electric Drive System*. Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, TN/USA, 2005.
- [93] GOVER, J., A Tutorial on Hybrid Electric Vehicles: EV, HEV, PHEV and FCEV, SAE International, Mid-Michigan Section, Kettering University, Flint, 2009.
- [94] PELSTER, R., et al.: *Thermospannungen - viel genutzt und fast immer falsch erklärt*. In: *PhyDid A - Physik und Didaktik in Schule und Hochschule* 4 (2005), pp. 10-22.
- [95] STIERSTADT, K., *Einführung*. Thermodynamik, Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 3-49. ISBN 978-3-642-05097-8
- [96] MÜLLER, E.: *Stille Reserve - Thermoelektrische Energiewandler erzeugen Strom aus Abwärme*. In: *DLR Nachrichten* 120 (2011), pp. 68-71.
- [97] TATARINOV, D., et al., *Thermoelektrische Systeme zur Energierückgewinnung im Kraftfahrzeug*. in: PROFF, H.; SCHÖNHARTING, J.; SCHRAMM, D.; ZIEGLER, J. (Eds.), *Zukünftige Entwicklungen in der Mobilität*, Gabler Verlag, 2012, pp. 213-225. ISBN 978-3-8349-3232-7
- [98] TRECHOW, P.: *Fahrzeugindustrie fahndet weiter nach Technik zur Abwärmenutzung*. In: *VDI nachrichten*: (2013.14.06.2013), p. 7.
- [99] FRIEDRICH, H., et al.: *Strom aus Abgasen — Fahrzeuggerechte Entwicklung Thermoelektrischer Generatoren*. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* 112 (2010), pp. 292-299.
- [100] MARANVILLE, C.: *Thermoelectric Opportunities for Light-Duty Vehicles*. In *proceedings: 3rd Thermoelectrics Applications Workshop*, Baltimore/USA, 21.03.2012, US Department of Energy (DOE), 2012.
- [101] MEISNER, G.P.: *Skutterudite Thermoelectric Generator For Automotive Waste Heat Recovery*. In *proceedings: 3rd Thermoelectrics Applications Workshop*, Baltimore/USA, 21.03.2012, US Department of Energy (DOE), 2012.
- [102] MAZAR, B.: *State of the Art Prototype Vehicle with a Thermoelectric Generator*. In *proceedings: 3rd Thermoelectrics Applications Workshop*, Baltimore/USA, 21.03.2012, US Department of Energy (DOE), 2012.
- [103] PESTER, W.; TRECHOW, R.: *Bordstrom direkt aus Autoabgas zapfen*. In: *VDI nachrichten*: (2009.30.10.), p. 19.
- [104] REICHENBACH, M.: *BMW: Bis zu 1000 Watt per Thermoelektrik möglich*. Aktualisierungsdatum: 27.03.2013. Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH.
- [105] MORICH, L., et al.: *Multifunktionalität Interieur*. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift atz-extra* (2008), pp. 156-165.
- [106] *Solar im Fahrzeug*. Aktualisierungsdatum: 14.03.2013. WEBASTO SE.

- [107] *Toyota Modelle - Prius*. Aktualisierungsdatum: 14.03.2013. Toyota Deutschland GmbH.
- [108] *Daimler gründet Tochtergesellschaft für innovative Mobilitätsdienstleistungen. Pressemitteilung vom 21.01.2013*. Aktualisierungsdatum: 15.03.2013. Daimler AG.
- [109] *eCarTec 2010: car2go-smart mit Solardach von Webasto. Pressemitteilung vom 19.10.2010*. Aktualisierungsdatum: 14.03.2013. WEBASTO SE.
- [110] BIERMANN, J.-W., *Der Elektro-Hybrid - eine Übersicht zu einem erfolgsversprechenden, alternativen Antrieb*. in: NAUNIN, D. (Ed.), *Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellenfahrzeuge - Technik, Strukturen und Entwicklungen*, expert verlag, ♦, 2007, pp. 65-77
- [111] ISERMANN, R. (Ed.) *Elektronisches Management motorischer Fahrzeugantriebe*. Vieweg+Teubner, 2010. ISBN 978-3-8348-0855-4
- [112] DUVAL-DESTIN, M., et al.: *Auswirkungen eines Elektroantriebs auf das Bremssystem*. In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* (2011), pp. 638-643.
- [113] GUZELLA, L.; SCIARETTA, A.: *Vehicle Propulsion Systems*. Springer-Verlag: Berlin Heidelberg, 2007. ISBN 978-3-540-74691-1
- [114] STIEGELER, M.: *Entwurf einer vorausschauenden Betriebsstrategie für parallele hybride Antriebsstränge*. Universität Ulm, Fakultät für Ingenieurwissenschaften und Informatik, Dissertation. 2008
- [115] KLEIMAIER, A.: *Optimale Betriebsführung von Hybridfahrzeugen*. Technische Universität München, Fakultät für Elektrotechnik und Informationstechnik, Dissertation. 2003
- [116] ZU ALTENTHAN UND WEIYHERHAUS, J.V.G.: *Ableitung einer heuristischen Betriebsstrategie für ein Hybridfahrzeug aus einer Online-Optimierung*. Technische Universität München, Dissertation. 2010
- [117] JÖRG, A.: *Optimale Auslegung und Betriebsführung von Hybridfahrzeugen*. Technische Universität München, Lehrstuhl für Elektrische Antriebssysteme, Dissertation. 2009
- [118] BACK, M.: *Prädiktive Antriebsregelung zum energieoptimalen Betrieb von Hybridfahrzeugen*. Universität Karlsruhe, Dissertation. 2006
- [119] KISACIKOGLU, M.C., et al.: *Load sharing using fuzzy logic control in a fuel cell/ultracapacitor hybrid vehicle*. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 34 (2009), pp. 1497-1507.
- [120] EREN, Y., et al.: *A fuzzy logic based supervisory controller for an FC/UC hybrid vehicular power system*. In: *International Journal of Hydrogen Energy* 34 (2009), pp. 8681-8694.
- [121] *Broschüre: Audi A6*. www.audi.de. Aktualisierungsdatum: 08.08.2013. Audi AG.
- [122] *Broschüre: Audi Q5*. www.audi.de. Aktualisierungsdatum: 08.08.2013. Audi AG.

- [123] *Touareg - Technik und Preise, gültig für das Modelljahr 2014.* www.volkswagen.de. Aktualisierungsdatum: 08.08.2013. Volkswagen AG.
- [124] REIF, K. (Ed.) *Konventioneller Antriebsstrang und Hybridantriebe.* Vieweg + Teubner Verlag | Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH: Wiesbaden, 2010. ISBN 978-3-8348-1303-9
- [125] SCHMIDT, M.: *Maßnahmen zur Reduktion des Energieverbrauchs von Nebenaggregaten im Kraftfahrzeug.* VDI-Verlag: Düsseldorf, 2003. ISBN 3-18-353712-5
- [126] *Die Studie Golf BlueMotion – die ersten Fakten. Pressemitteilung vom 26.09.2012.* www.volkswagen.de. Aktualisierungsdatum: 14.08.2013. Volkswagen AG.
- [127] SCHINKE, H., et al.: *Ergonomie und Ökonomie in schnittiger Verpackung.* In: *ATZ - Automobiltechnische Zeitschrift* ATZ-extra September 2012 (2012), pp. 20-23.
- [128] *Multi-year research, development and demonstration plan, Hydrogen, fuel cells & infrastructure technologies program.* Department of Energy, USA, 2012.
- [129] *Stichwort „Separator (Batterie)“.* <http://de.wikipedia.org>. Aktualisierungsdatum: 10.04.2009. Wikipedia.
- [130] ARIYOSHI, K.; OHZUKU, T.: *Conceptual design for 12 V "lead-free" accumulators for automobile and stationary applications.* In: *Journal of Power Sources* 174 (2007), pp. 1258-1262.
- [131] BRAUN, W., et al.: *Batterien für Elektromobilität gestern - heute - morgen.* In *proceedings:* Vorlesungsreihe "Energie und Klimaschutz" des Arbeitskreises Regenerative Energie, Hannover, Januar 2010, Leibniz Universität Hannover, 2010.
- [132] *Stichwort „Bleiakkumulator“.* <http://de.wikipedia.org>. Aktualisierungsdatum: 10.04.2009.
- [133] *Plug-In-Hybrid mit Lithium-Ionen Batterie, Pressemitteilung vom 19.03.2009, Toyota Deutschland GmbH.* http://www.toyota.de/innovation/hsd/details_2008_08.aspx. Aktualisierungsdatum: 10.04.2009.
- [134] MORAWIETZ, L., et al.: *Thermoelektrischen Modellierung eines Lithium-Ionen-Energiespeichers für den Fahrzeugeinsatz.* In *proceedings:* Innovative Fahrzeugantriebe 2008, Dresden, November 2008, VDI, 2008.
- [135] VETTER, J., et al.: *Ageing mechanisms in lithium-ion batteries.* In: *Journal of Power Sources* 147 (2005), pp. 269-281.

Anhang

Anhang A: Verzeichnis der Abbildungen	161
Anhang B: Verzeichnis der Tabellen.....	165
Anhang C: Verzeichnis der Abkürzungen, Formelzeichen und Indices	167
Anhang D: Simulationsgestützte Kraftstoffverbrauchsanalyse – Beispiele.....	171
Anhang E: Verwendete Symbolik zur Darstellung der untersuchten Konzepte	173
Anhang F: Fahrzeugklassenbezeichnungen.....	175
Anhang G: Verwendete Fahrzyklen	177
Anhang H: Leistungs- und Betriebsdaten von Batterien	185
Anhang I: Ergebnisvektor der Simulationsmodelle	191
Anhang J: Massen der Antriebskomponenten	193
Anhang K: Ergebnisse der Kraftstoffverbrauchsbestimmung	195
Anhang L: Wirkungsgrade und energetische Nutzungsgrade	239
Anhang M: Ermittelte Verbrauchsreduktionspotentiale	253

ANHANG A:

VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN

Bild 1-1: Trend zu höherem Elektrifizierungsgrad von Pkw-Antrieben.	2
Bild 3-1: Querspanfläche (links) und Luftwiderstandsbeiwerte (rechts) für unterschiedliche Fahrzeugklassen.	14
Bild 3-2: Kräfte am Fahrzeug.	15
Bild 3-3: Geschwindigkeitsabhängige Kennwerte von Pkw-Reifen.	17
Bild 3-4: Berechnete Drehmassenzuschlagfaktoren für den Referenz-Pkw.	19
Bild 3-5: Zugkraftkennlinien des Referenz-Pkw.	20
Bild 3-6: Mechanischer Energieumsatz des Referenz-Pkw in den verfügbaren Fahrzyklen.	23
Bild 3-7: Vereinfachtes Modell des Fahrzeuginnenraums.	29
Bild 3-8: Motorkennung und Betriebskennfeld von Verbrennungsmotoren im Szenario „Standard“.	35
Bild 3-9: Motorkennung und Betriebskennfeld von Verbrennungsmotoren im Szenario „Zukunft“.	35
Bild 3-10: Motorkennung und Betriebskennfeld der im Modell verwendeten Elektromaschinen [70] im Szenario „Standard“.	37
Bild 3-11: Motorkennung und Betriebskennfeld der im Modell verwendeten Elektromaschinen [70] im Szenario „Zukunft“.	37
Bild 3-12: Getriebewirkungsgrad in Abhängigkeit des normierten Eingangsdrehmoments.	38
Bild 3-13: Energiedurchsatz in unterschiedlichen Ausprägungen von HEV.	40
Bild 3-14: Ragone-Diagramm von Batterien und Doppelschichtkondensatoren.	42
Bild 3-15: Batteriemodell für die Simulation.	43
Bild 3-16: Korrektur von Klemmenspannung und Batteriekapazität aufgrund des Temperatureinflusses.	44
Bild 3-17: Stromerzeugungssystem mit Niedertemperaturbrennstoffzellen vom Typ PEFC.	47
Bild 3-18: Betriebsverhalten von PEFC für Fahrzeuganwendungen.	49
Bild 3-19: Betriebsverhalten eines Gleichspannungswandlers.	51
Bild 4-1: Klassifizierung von Hybridkonzepten.	56
Bild 4-2: Klassifizierung von Betriebsstrategien für Hybrid-Pkw.	60
Bild 4-3: Vereinfachtes Schema des Verbrennungsmotorantriebs.	65
Bild 4-4: Vereinfachtes Schema des Parallelhybridantriebs.	66
Bild 4-5: Vereinfachtes Schema des Batterieantriebs.	68
Bild 4-6: Vereinfachtes Schema des Brennstoffzellenantriebs.	69
Bild 5-1: Vereinfachter Programmablaufplan zur Beschreibung des Ablaufs der Simulationsrechnungen.	73
Bild 5-2: Hauptansicht der Simulationsmodelle.	74
Bild 5-3: Längsdynamisches Fahrzeugmodell gemäß Abschnitt 3.1.	77
Bild 5-4: Vereinfachter Programmablaufplan von Skalierungsroutinen.	78

Bild 5-5:	Programmablaufplan der Massenbestimmung von Antriebskomponenten.	79
Bild 5-6:	Umkehrfunktion der Motorkennung im Bereich monoton steigender Drehmomentwerte.	82
Bild 5-7:	Maximales Drehmoment der Elektromaschine in Abhängigkeit von der Drehgeschwindigkeit und vom elektrischen Leistungsangebot.	83
Bild 5-8:	Programmablaufplan des Teilmodells Brennstoffzellensystem.	85
Bild 5-9:	Programmablaufplan des Teilmodells Batterie.	86
Bild 5-10:	Struktur der Simulationsmodelle, dargestellt als vereinfachter Programmablaufplan.	89
Bild 5-11:	Optionale Getriebeeingangsdrehmomente (links) und -drehzahlen (rechts) im Fahrzyklus EUDC.	93
Bild 5-12:	Optionales Getriebeeingangsdrehmoment des ersten Gangs im Fahrzyklus EUDC.	94
Bild 5-13:	Optionale Verbrennungsmotor- (links) und Elektromaschinendrehmomente (rechts) des ersten Gangs im Fahrzyklus EUDC.	96
Bild 5-14:	Verläufe der Kraftstoffnutzungsgrade für ICV (links) und BEV (rechts) im Fahrzyklus EUDC.	97
Bild 5-15:	Veranschaulichung der Bilanz elektrischer Leistungen im Hochspannungsbordnetz anhand exemplarischer Betriebspunkte.	98
Bild 5-16:	Verläufe der Kraftstoffnutzungsgrade für PAH während der ersten Beschleunigungsphase im Fahrzyklus EUDC.	100
Bild 5-17:	Verläufe optionaler Kraftstoffnutzungsgrade (links) und Ansteuerung des Brennstoffzellensystems (rechts) bei FCV während der ersten Beschleunigungsphase des Fahrzyklus EUDC.	102
Bild 5-18:	Programmablaufplan der Getriebesteuerung.	103
Bild 5-19:	Verlauf der Generatorleistung während des rekuperativen Bremsens im EUDC.	104
Bild 5-20:	Programmablaufplan des ICV-Simulationsmodells.	106
Bild 5-21:	Programmablaufplan des PAH-Simulationsmodells.	108
Bild 5-22:	Programmablaufplan des BEV-Simulationsmodells.	109
Bild 5-23:	Programmablaufplan des FCV-Simulationsmodells.	110
Bild 6-1:	Anpassung der Fahrwiderstandskurve für das Szenario „Zukunft“.	116
Bild 6-2:	Kraftstoffverbrauchswerte von ICV-G für den Bordnetzlastfall „Nur Grundlast“ im Szenario „Standard“.	117
Bild 6-3:	Mittlere Kraftstoffverbrauchswerte von ICV mit Ottomotor im Szenario „Standard“.	119
Bild 6-4:	Mittlere Verbrennungsmotorwirkungsgrade von ICV mit Ottomotor im Szenario „Standard“.	120
Bild 6-5:	Mittlere differentielle Wirkungsgrade der Stromerzeugung bei ICV mit Ottomotor im Szenario „Standard“.	121
Bild 6-6:	Mittlere energetische Nutzungsgrade von ICV mit Ottomotor im Szenario „Standard“.	121
Bild 6-7:	Mittlere Kraftstoffverbrauchswerte von ICV mit Ottomotor im Szenario „Zukunft“.	122
Bild 6-8:	Mittlere Verbrennungsmotorwirkungsgrade von ICV mit Ottomotor im Szenario „Zukunft“.	122
Bild 6-9:	Mittlere energetische Nutzungsgrade von ICV mit Ottomotor im Szenario „Zukunft“.	123

Bild 6-10: Mittlere Kraftstoffverbrauchswerte von ICV mit Dieselmotor im Szenario „Zukunft“	123
Bild 6-11: Mittlere Kraftstoffverbrauchswerte von PAH mit Ottomotor im Szenario „Standard“	125
Bild 6-12: Mittlere Verbrennungsmotorwirkungsgrade von PAH mit Ottomotor im Szenario „Standard“	126
Bild 6-13: Mittlere differentielle Wirkungsgrade der Stromerzeugung bei PAH mit Ottomotor im Szenario „Standard“	127
Bild 6-14: Mittlere energetische Nutzungsgrade von PAH mit Ottomotor im Szenario „Standard“	127
Bild 6-15: Mittlere Kraftstoffverbrauchswerte von PAH mit Ottomotor im Szenario „Zukunft“	128
Bild 6-16: Mittlere Verbrennungsmotorwirkungsgrade von PAH mit Ottomotor im Szenario „Zukunft“	129
Bild 6-17: Mittlere energetische Nutzungsgrade von PAH mit Ottomotor im Szenario „Zukunft“	129
Bild 6-18: Mittlere Kraftstoffverbrauchswerte von PAH mit Dieselmotor im Szenario „Zukunft“	130
Bild 6-19: Mittlere Stromverbrauchswerte von BEV im Szenario „Standard“	131
Bild 6-20: Mittlere Elektromaschinenwirkungsgrade (Motorbetrieb) von BEV im Szenario „Standard“	132
Bild 6-21: Mittlere energetische Nutzungsgrade von BEV im Szenario „Standard“	132
Bild 6-22: Mittlere Kraftstoffverbrauchswerte von BEV im Szenario „Zukunft“	133
Bild 6-23: Mittlere energetische Nutzungsgrade von BEV im Szenario „Zukunft“	133
Bild 6-24: Mittlere Kraftstoffverbrauchswerte von FCV im Szenario „Standard“	135
Bild 6-25: Mittlere elektrische Wirkungsgrade des Brennstoffzellensystems bei FCV im Szenario „Standard“	135
Bild 6-26: Mittlere energetische Nutzungsgrade von FCV im Szenario „Standard“	136
Bild 6-27: Mittlere Kraftstoffverbrauchswerte von FCV im Szenario „Zukunft“	136
Bild 6-28: Verbrauchsreduktion durch die Nutzung von thermoelektrischen Generatoren und Photovoltaikmodulen	138
Bild 6-29: Einfluss der spezifischen Energie der Batterie auf den Kraftstoffverbrauch von BEV	139
Bild 6-30: Mittlere Verbrauchsreduktionspotentiale von ICV-G, PAH-G, BEV und FCV im Szenario „Zukunft“ gegenüber ICV-G im Szenario „Standard“	141
Bild 6-31: Ergebnisse simulationsgestützter Kraftstoffverbrauchsanalysen für unterschiedliche Pkw-Konzepte	142

ANHANG B:

VERZEICHNIS DER TABELLEN

Tab. 1-1: Pkw-Konzepte und Antriebstopologien.	6
Tab. 2-1: Simulationsgestützte Kraftstoffverbrauchsanalyse – Literaturübersicht.	9
Tab. 3-1: Parameter der untersuchten Pkw des A- und C-Segments.	14
Tab. 3-2: Fahrzeugdaten des Referenz-Pkw mit Ottomotor (ICV-G) im Szenario „Standard“.	16
Tab. 3-3: Fahrleistungsanforderungen für Pkw des A- und C-Segments zur Skalierung der Antriebskomponenten.	21
Tab. 3-4: Charakterisierung verwendeter Fahrzyklen.	22
Tab. 3-5: Schaltbilder der Hochspannungs- und 14 V-Bordnetzvarianten.	25
Tab. 3-6: Leistung elektrischer Nebenverbraucher und Charakterisierung der Betriebsdauer.	26
Tab. 3-7: Untersuchte Fälle der Fahrzeuginnenraumklimatisierung.	29
Tab. 3-8: Parameter zur Ermittlung des Wärme- oder Kältebedarfs.	33
Tab. 3-9: Leistungsdaten von Batterien.	42
Tab. 4-1: Funktionalitäten der analysierten Fahrzeugkonzepte.	57
Tab. 4-2: Beispiele für Betriebsstrategieentwicklungen.	61
Tab. 5-1: Vorzeichenkonvention für in dieser Arbeit erstellte Simulationsmodelle.	71
Tab. 5-2: Dokumentierte Leistungsverläufe nach Energieform zur Auswertung der Ergebnisse.	76
Tab. 6-1: Definition der Bordnetzlastfälle.	113
Tab. 6-2: Untersuchungsmatrix zur Analyse des Kraftstoffverbrauchs der betrachteten Pkw- Konzepte.	114
Tab. 6-3: Annahmen für die Szenarien „Standard“ und „Zukunft“.	115
Tab. 6-4: Fahrzeugmassen [kg] sowie Verbrennungs- und Elektromotorleistung [kW] der untersuchten Konzepte.	118
Tab. 6-5: Verbrauchswerte von ICV für unterschiedliche Fahrzyklen und Bordnetzlastfälle.	124
Tab. 6-6: Verbrauchswerte von PAH für unterschiedliche Fahrzyklen und Bordnetzlastfälle.	130
Tab. 6-7: Verbrauchswerte von BEV für unterschiedliche Fahrzyklen und Bordnetzlastfälle.	134
Tab. 6-8: Verbrauchswerte von FCV für unterschiedliche Fahrzyklen und Bordnetzlastfälle.	137

ANHANG C:

VERZEICHNIS DER ABKÜRZUNGEN, FORMELZEICHEN UND INDICES

Abkürzungen

AGM	VRLA-Variante mit in einem Vlies gebundenen Elektrolyten (<i>Absorbent glass mat</i>)	LKR	Luftkühler
AGR	Abgasrückführung	LPA	Lastpunktanhebung
ARTEMIS	<i>Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory Systems</i> (Fahrzyklus)	LPR	Lastpunktreduzierung
APU	Bordstromversorgungseinheit (<i>Auxiliary power unit</i>)	Ltg.	Leitung
Batt.	Batterie	MHZ	Maximaler Heizbedarf
BE	batterieelektrisch	MKÜ	Maximaler Kühlbedarf
BEF	Befeuchter	MODEM	<i>Modelling of Emissions and Fuel Consumption in Urban Areas</i> (Fahrzyklus)
BER	Bremsenergierückgewinnung	MVEG	<i>Motor Vehicle Emissions Group</i> (Fahrzyklus)
BEV	Batterieelektrischer Pkw (<i>Battery electric vehicle</i>)	PA	<i>Power assist</i>
BPV	Betriebspunktverschiebung	PAH	Parallelhybrid
BT	Batterie	PEFC	Polymerelektrolytmembranbrennstoffzellen (<i>Polymer electrolyte fuel cells</i>)
BZ	Brennstoffzelle bzw. Brennstoffzellenstapel	PHEV	<i>Plug-in hybrid electric vehicle</i>
BZS	Brennstoffzellensystem	Pkw	Personenkraftwagen
ECE	Economic Commission for Europe (Fahrzyklus)	PSH	<i>Power-split</i> Hybrid
EM	Elektromaschine	PTC	<i>Positive temperature coefficient</i>
EUDC	<i>Extra Urban Driving Cycle</i> (Fahrzyklus)	REV	Batterieelektrischer Pkw mit <i>Range extender</i>
FCV	Brennstoffzellen-elektrischer Pkw (<i>Fuel cell electric vehicle</i>)	RKB	Rekuperatives Bremsen
FLC	<i>Fuzzy logic controller</i>	S.	Seite
FRT	Frosttag (klimatologischer Kenntag)	SLI	Starterbatterie (<i>Starting, lighting, ignition</i>)
FTP	<i>Federal Test Procedure</i> (Fahrzyklus)	SOC	Batterieladezustand (<i>State of charge</i>)
Ggt.	Gegenteil	SOFC	Festoxidbrennstoffzellen (<i>Solid oxide fuel cell</i>)
GRL	Bordnetzlastfall „Nur Grundlast“	SOT	Sommertag (klimatologischer Kenntag)
GW	Gleichspannungswandler	SSA	Stopp-Startfunktion
HS	Hochspannung	SUV	<i>Sport utility vehicle</i>
HWFET	<i>Highway Fuel Economy Test</i>	Tab.	Tabelle
HYZEM	<i>Hybrid Technology Approaching Efficient Zero Emission Mobility</i> (Fahrzyklus)	TEG	Thermoelektrischer Generator
ICV	Pkw mit Verbrennungsmotor (<i>Internal combustion engine vehicle</i>)	TTW	<i>Tank-to-wheel</i>
KAS	Kondensatabscheider	TUB	Turbine
KBH	Kabinenheizung	UDDS	<i>Urban Dynamometer-Driving Schedule</i>
KKL	Bordnetzlastfall „Keine Klimatisierung“	VM	Verbrennungsmotor/ verbrennungsmotorisch
KL	Klimagerät	VRLA	Verschlossene Bleibatterie (<i>Valve regulated lead-acid battery</i>)
KMP	Kühlmittelpumpe	WLTC	<i>Worldwide harmonized Light-duty Driving Test Cycle</i> (Fahrzyklus)
KOP	Kompressor	WST	Wassertank
KS	Kraftstoff	WTT	<i>Well-to-tank</i>
LA	<i>Launch assist</i>	WTW	<i>Well-to-wheel</i>

Formelzeichen und Indices

Lateinische Formelzeichen und Symbole

a	Beschleunigung [$m\ s^{-2}$]
c	Konstante/Beiwert
c	spezifische Wärmekapazität [$J\ g^{-1}\ K^{-1}$]
c_p	spezifische Wärmekapazität bei konstantem Druck [$J\ g^{-1}\ K^{-1}$] bzw. [$J\ mol^{-1}\ K^{-1}$]
c_W	Luftwiderstandsbeiwert, dimensionslos
c_z	Auftriebsbeiwert, dimensionslos
f_{roll}	Rollwiderstandsbeiwert, dimensionslos
h	Charakteristische Höhe [m]
i	Übersetzungsverhältnis, dimensionslos
$k \cdot A$	Wärmeübergangszahl [$J\ K^{-1}$]
m	Masse [g]
\dot{m}	Massenstrom [$g\ s^{-1}$]
r	Statischer Rollradius [m]
s	Weg [m]
t	Zeit [s]
v	Geschwindigkeit [$m\ s^{-1}$]
x	Verhältnis; Gangstufe
z	Ladungszahl je Molekülumsatz
z	Zahl der Gangstufen
A	Fläche [m^2]
C	Kapazität
C_{12}	Strahlungsaustauschkonstante
E	Energie [J]
F	Faraday-Konstante ($F = 96\ 488\ As\ mol^{-1}$)
F	Kraft [N]
H_2O, s	Wasser im Sättigungszustand
H_u	Unterer Heizwert
\dot{H}	Enthalpiestrom
I	Strom [A]
J	Massenträgheitsmoment
J^*	Ersatzträgheitsmoment
L	Charakteristische Länge [m]
M	Drehmoment [Nm]
P	Leistung [W]
Q	Ladung [As] und Wärme [J]
\dot{Q}	Wärmestrom [W]
R	Dynamischer Rollradius [m]
SOC	Batterieladezustand (<i>State of charge</i>)
T	Temperatur [K]
U	Spannung [V]
V	Volumen [m^3]
\dot{V}	Volumenstrom [$m^3\ s^{-1}$]
Z	Menge der ganzen Zahlen

Griechische Formelzeichen

α	Wärmeübergangskoeffizient; Absorptionsgrad [$Wm^{-2}K^{-1}$]
α_H	Hybridisierungsgrad, dimensionslos
β	Steigungswinkel [$^\circ$]

γ	Einfallswinkel [$^\circ$]
ε	Emissionsgrad, dimensionslos
η	Wirkungsgrad, dimensionslos
ϑ	Temperatur [$^\circ C$]
λ	Drehmassenzuschlagfaktor, dimensionslos
ϱ	Dichte [$g\ m^{-3}$]
σ	Stefan-Boltzmann-Konstante [$Wm^{-2}K^{-4}$]
τ	Transmissionskoeffizient, dimensionslos
φ	Höhenwinkel [$^\circ$]
χ	Anstellwinkel [$^\circ$]
ψ	Horizontalwinkel [$^\circ$] (Azimut, 0° für Norden)
ω	Drehgeschwindigkeit [s^{-1}]

Lateinische Indices

0	Anfangswert; Basiswert
ab	abgeführt/ am Austritt (Ggt.: <i>zu</i>)
abs	absorbiert
bft	(Gas-) Befeuchtung
bms	für den Bremsfall geltend (Ggt.: <i>vtb</i>)
brt	Brutto (Ggt.: <i>net</i>)
ch	chemisch
$diff$	differentiell
e	elektrisch
elc	bezogen auf die elektrochemische Reaktion
h	hinten (Ggt.: <i>v</i>)
etl	entladen (Batterie) (Ggt.: <i>ldn</i>)
gen	im Generatorbetrieb (Ggt.: <i>mot</i>)
ges	gesamt
i	Zählindex
ist	Istwert (Ggt.: <i>soll</i>)
kds	Kondensation
knv	konvektiv
ldn	laden (Batterie) (Ggt.: <i>etl</i>)
m	mechanisch
max	maximal (Ggt.: <i>max</i>)
min	minimal (Ggt.: <i>min</i>)
mol	molar
mot	im Motorbetrieb (Ggt.: <i>gen</i>)
mt	Momentanwert
neg	negative Werte (Ggt.: <i>pos</i>)
net	netto (Ggt.: <i>brt</i>)
nom	nominal
obg	obere Betriebsgrenze (Ggt.: <i>ubg</i>)
pos	positive Werte (Ggt.: <i>neg</i>)
pri	primär
$roll$	Roll-
$schlepp$	Schlepp-
sek	sekundär
sol	solar
$soll$	Sollwert (Ggt.: <i>ist</i>)

<i>spez</i>	spezifisch
<i>str</i>	Strahlung
<i>th</i>	thermisch
<i>trans</i>	transmittiert
<i>u</i>	Umfang
<i>ubg</i>	untere Betriebsgrenze (Ggt.: <i>obg</i>)
<i>um</i>	(chemisch) umgesetzt
<i>v</i>	vorn (Ggt.: <i>h</i>)
<i>vtb</i>	für den Vortriebsfall geltend
<i>vwd</i>	Verweildauer (einer Gangstufe)
<i>w</i>	Fahrwiderstand
<i>x</i>	in x-Richtung (Fahrtrichtung)
<i>y</i>	in y-Richtung (Fahrtrichtung)
<i>z</i>	in z-Richtung (Fahrtrichtung)
<i>zg</i>	unmittelbar (zeitgleich)
<i>zu</i>	Zugeführt/ am Eintritt (Ggt.: <i>ab</i>)
<i>zv</i>	zeitverzögert
<i>A</i>	an der Außenseite
<i>AC</i>	Auf die Kabinenklimatisierung bezogen
<i>AM</i>	Antriebsmaschine(n)
<i>AT</i>	Achsantrieb
<i>B</i>	Beschleunigung
<i>BN</i>	Bordnetz
<i>Batt</i>	Batterie
<i>BFZ</i>	Basisfahrzeug, ohne Antrieb und Tank
<i>Bst</i>	Boost-Betrieb
<i>BTB</i>	Mechanische Betriebsbremse
<i>BZ</i>	Brennstoffzelle/ Brennstoffzellenstapel
<i>BZS</i>	Brennstoffzellensystem
<i>E</i>	(gesamt-) energetisch
<i>EM</i>	Elektromaschine
<i>EMG</i>	Elektromaschine, Motorbetrieb
<i>EMM</i>	Elektromaschine, Generatorbetrieb
<i>EOD</i>	<i>End of discharge</i>
<i>ET</i>	Einbauteile
<i>F</i>	Fahrzeug
<i>G</i>	Gewicht
<i>Gen</i>	Generator/ Generatorbetrieb
<i>GT</i>	Getriebe
<i>GTE</i>	Getriebeeingang (bei PAH nach Elektromaschine)
<i>H</i>	Haft-
<i>HS</i>	Hochspannung

<i>HSN</i>	Hochspannungsnetz
<i>I</i>	an der Innenseite
<i>KB</i>	Kabine (Pkw-Innenraum)
<i>KLL</i>	Kühlluft
<i>KLM</i>	Kühlmittel
<i>KS</i>	Kraftstoff
<i>KSB</i>	Bezogen auf die Prozesskette VM – EM – GW – BT-laden
<i>KTI</i>	Karosserieteile, Innenseite
<i>KTA</i>	Karosserieteile, Außenseite
<i>L</i>	Luft
<i>Lrl</i>	Leerlauf
<i>Ltg</i>	Leitung
<i>Mot</i>	Motorbetrieb
<i>NP</i>	Nutzungspfad
<i>NPA</i>	Nutzungspfad Antrieb
<i>NPB</i>	Nutzungspfad Bordnetz
<i>NV</i>	Nebenverbraucher
<i>Q</i>	Querspann
<i>R</i>	Rad
<i>Rek</i>	Rekuperation
<i>RC</i>	RC-Glied
<i>S</i>	Schwerpunkt
<i>SBS</i>	Strombereitstellung
<i>SBN</i>	Strombereitstellung und -nutzung
<i>S</i>	Fensterscheiben
<i>SNI</i>	Fensterscheiben, Innenseite
<i>SNA</i>	Fensterscheiben, Außenseite
<i>St</i>	Steigung
<i>Umg</i>	Umgebung
<i>V</i>	Verlust
<i>VM</i>	Verbrennungsmotor
<i>W</i>	Luftwiderstand
<i>Zwk</i>	Zwischenkreis

Griechische Indices

α	am Eintritt
ω	am Austritt

ANHANG D:

SIMULATIONSGESTÜTZTE KRAFTSTOFFVERBRAUCHSANALYSE – BEISPIELE

Anmerkung: Quellenangaben sind der Bibliographie auf Seite 149 zu entnehmen.

Ein häufig eingesetztes Simulationswerkzeug zur Verbrauchsanalyse von Pkw-Konzepten ist der *Advanced Vehicle Simulator* ADVISOR [14], der 1994 vom National Renewable Energy Laboratory (NREL) vorgestellt wurde. Einsatzzweck war zunächst die Unterstützung verkehrsbezogener Förderaktivitäten des US Department of Energy (US-DOE). ADVISOR nutzt unter Hinweis auf deutlich reduzierte Simulationsgeschwindigkeiten im Wesentlichen Rückwärtsmodelle. ADVISOR wurde 2004 von der AVL List GmbH übernommen. Die Modellierung von Antriebskomponenten stützt sich weitgehend auf Betriebskennfelder. Simulationsergebnisse mit ADVISOR wurden zum Beispiel in Kromer et al. 2008 [15] dokumentiert und beziehen sich auf eine vergleichende Analyse unterschiedlicher Pkw-Konzepte für die Zeithorizont 2030 (siehe Bild 6-31).

Das Simulationswerkzeug FCVsim beschäftigt sich ausschließlich mit Brennstoffzellen-Pkw im Wasserstoffbetrieb. Der besondere Schwerpunkt liegt in der Modellierung von Brennstoffzellenstapel und -systemkomponenten. Eine detaillierte Beschreibung ist in Moore et al. (2005) zu finden [17].

LFM (*light, fast and modifiable*) nutzt dynamische Modelle von Hybridkonzepten und ist so angelegt, dass *Performance*-Analysen zügig durchgeführt werden können. Parameterstudien sollen durch vereinfachte Modellmodifikation und automatisierte Simulationsdurchläufe mit geringem Aufwand durchführbar sein [18]. Brennstoffzelle, Elektromotor und Kraftübertragung werden mithilfe von Betriebskennfeldern simuliert.

Mit dem Powertrain Systems Analysis Toolkit (PSAT) wurde am Argonne National Laboratory (ANL) ein weiteres Simulationswerkzeug entwickelt. Ebenfalls auf der Basis von Matlab/Simulink® und unter Nutzung von Stateflow® kommen dynamische Modelle zum Einsatz. Bisherige Anwendungen lagen im Bereich der Hybridfahrzeugentwicklung [20, 21] und der vergleichenden Analyse von Brennstoffzellen-Pkw im Direktwasserstoffbetrieb und konventionellen Pkw [19]. PSAT wurde auch im Rahmen der FreedomCar Initiative des US Department of Energy (US-DOE).

Kraftstoffverbrauchsanalysen am Forschungszentrum Jülich haben sich mit BEV, FCV und ICV beschäftigt. Detailliert wurde die Nutzung von APUs in ICV untersucht. Als Simulationsplattformen kam Matlab/Simulink, teilweise in Kombination mit AVL CRUISE zur Anwendung. Ergebnisse sind in [25, 26, 27] zu finden.

ANHANG E:

VERWENDETE SYMBOLIK ZUR DARSTELLUNG DER UNTERSUCHTEN KONZEPTE

Nach Isermann (2008) [7]

Quellen

KT

Kraftstofftank

Wandler

BZ

Brennstoffzellensystem



EM

Elektromotor



GE

Generator



HE

Heizelement



KL

Klimagerät



VM

Verbrennungsmotor

Übertrager

GT/AT

Getriebe/Achsgetriebe



LE

Leistungselektronik

Speicher

BT

Batterie

Senken

AE

Antriebsenergie



BN

Bordnetz



KE

Kühlenergie



WE

Wärmeenergie

ANHANG F:
FAHRZEUGKLASSENBEZEICHNUNGEN

Pkw-Segmente nach EU-Klassifizierung [9]

A-Segment: Kleinstwagen

B-Segment: Kleinwagen

C-Segment: Mittelklasse

D-Segment: Obere Mittelklasse

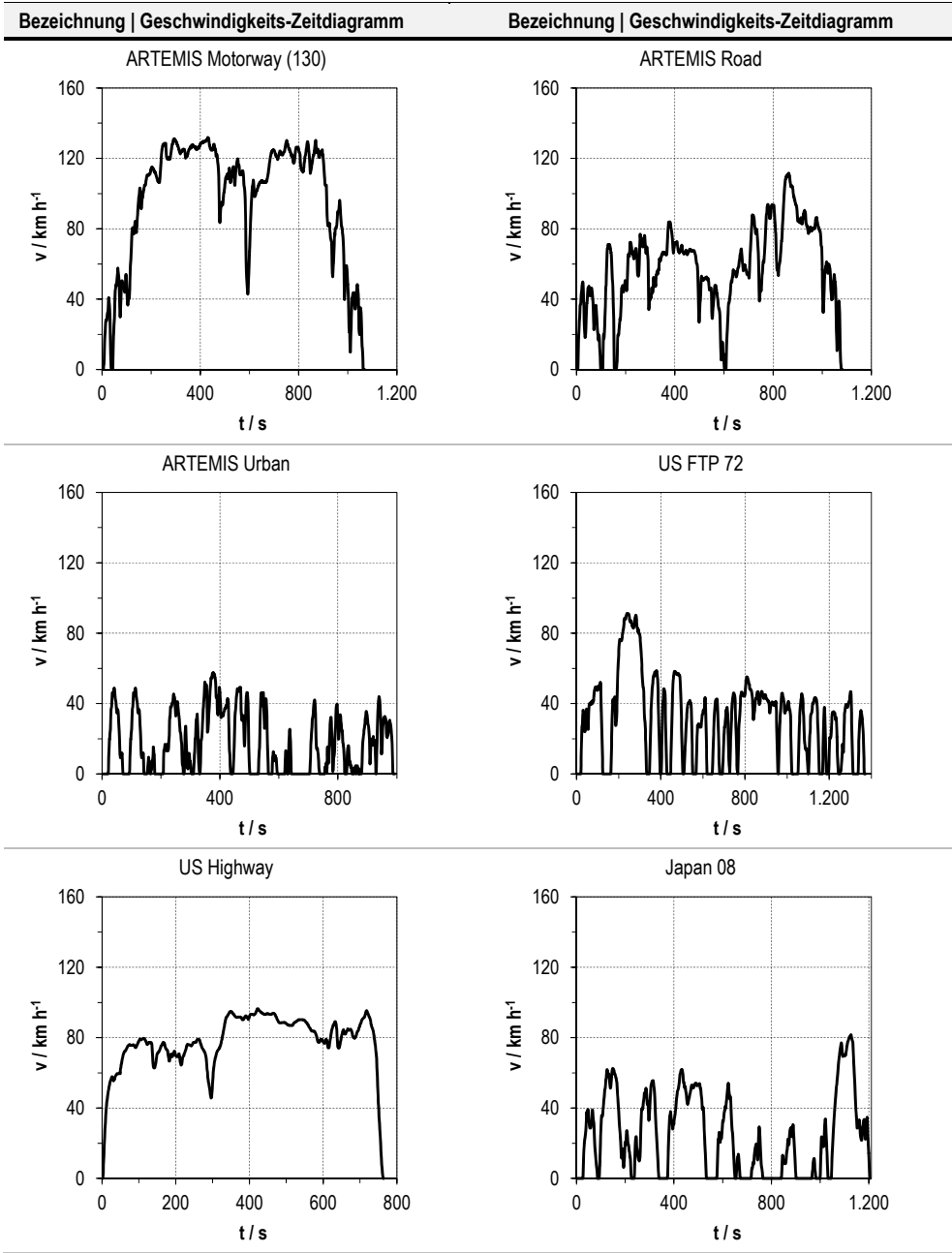
E-Segment: Oberklasse

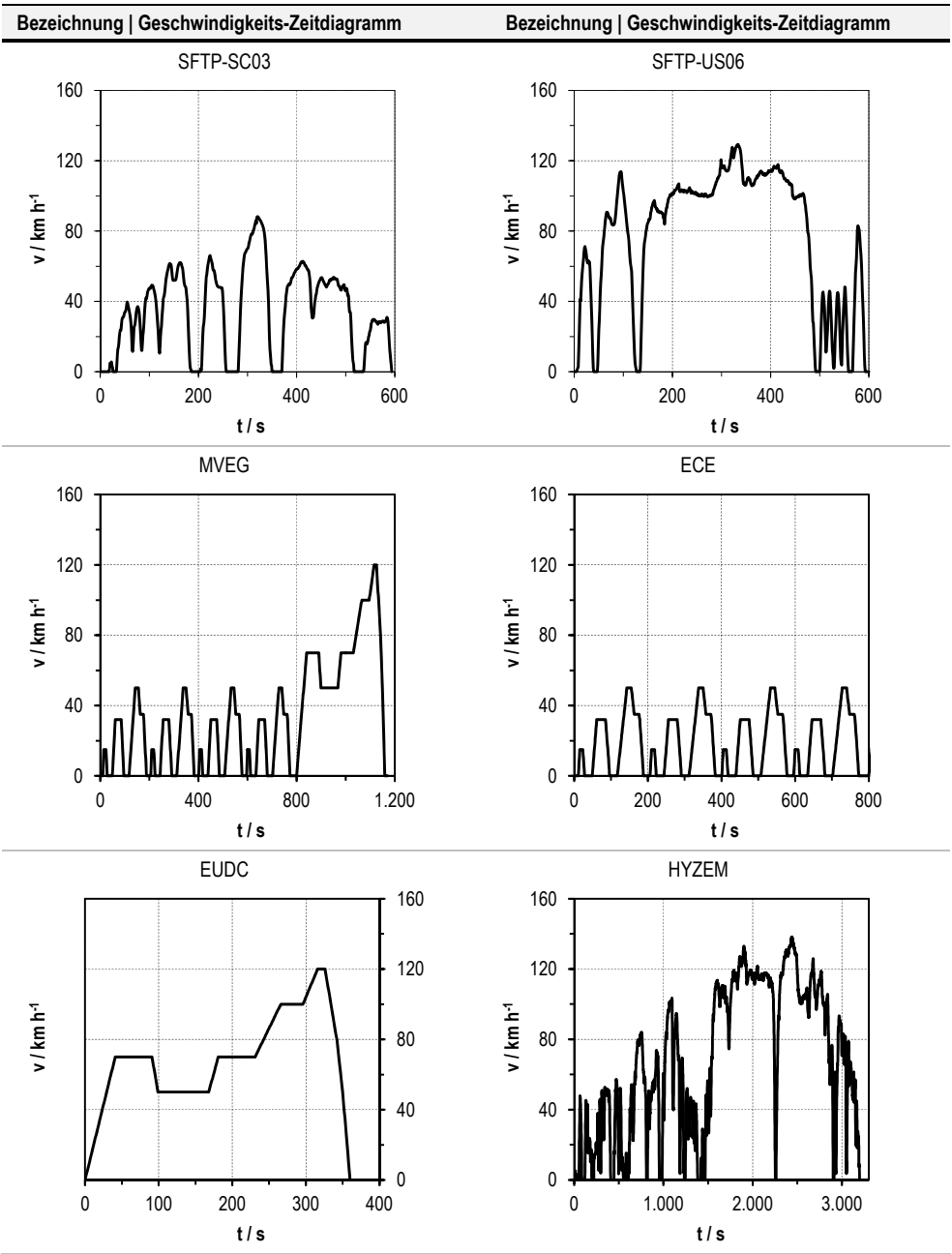
F-Segment: Luxusklasse

G-Segment: Mehrzweck, Sportwagen

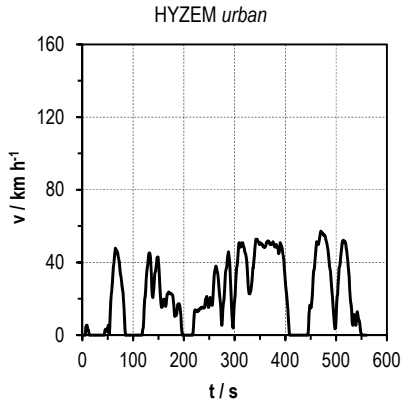
ANHANG G:
VERWENDETE FAHRZYKLEN

Geschwindigkeits-Zeitdiagramme der verwendeten Fahrzyklen.
ARTEMIS Motorway wird in der Variante mit einer maximalen Geschwindigkeit von 130 km h^{-1} gewählt.

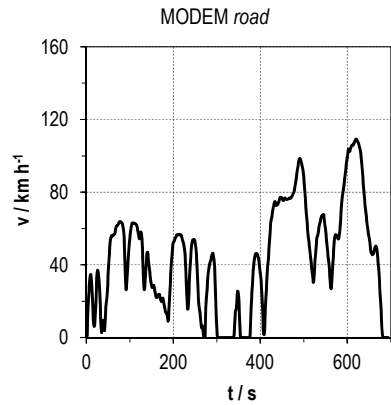
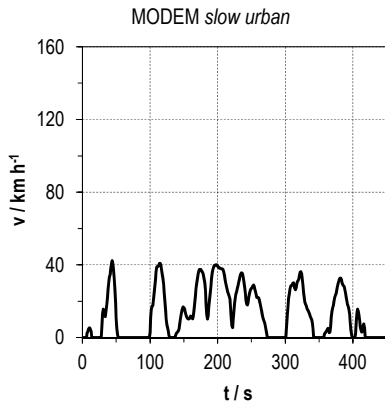
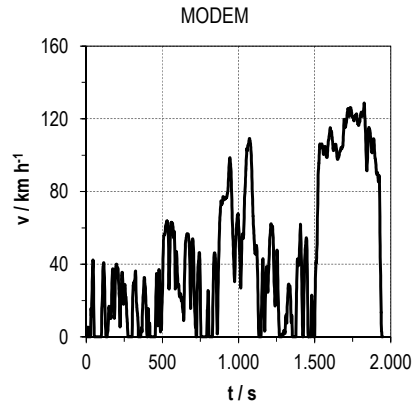
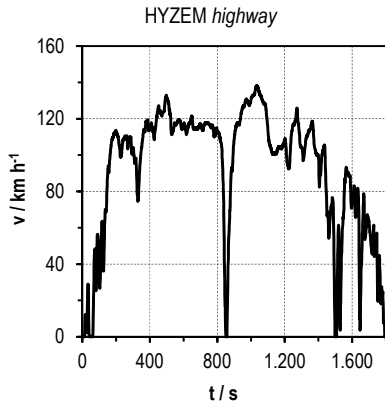
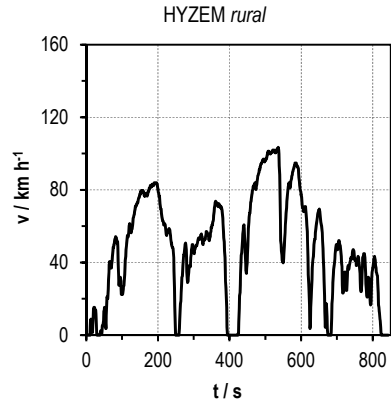


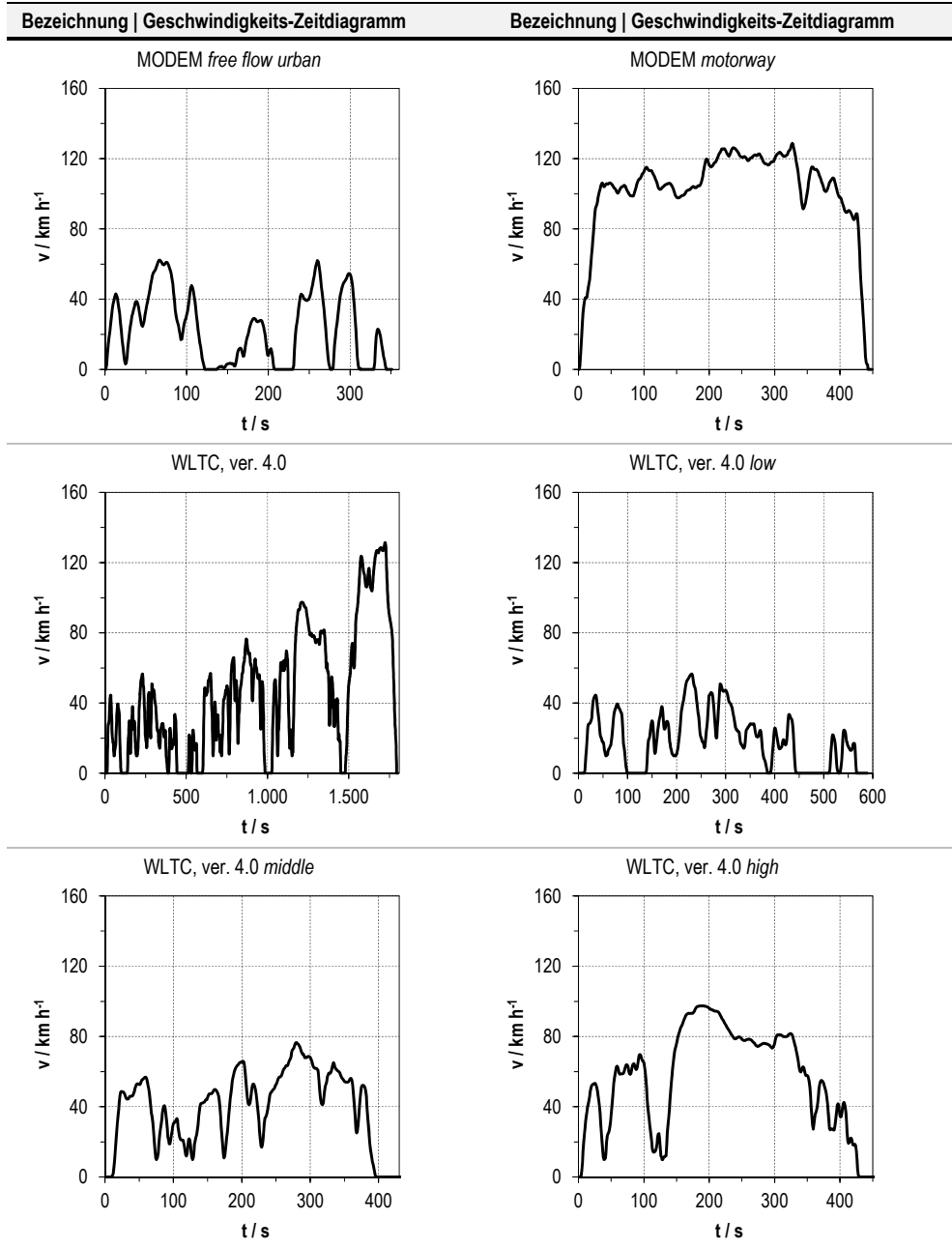


Bezeichnung | Geschwindigkeits-Zeitdiagramm



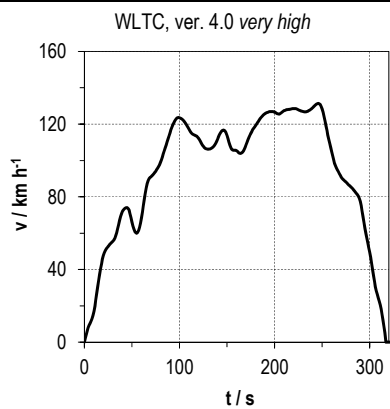
Bezeichnung | Geschwindigkeits-Zeitdiagramm





Bezeichnung | Geschwindigkeits-Zeitdiagramm

Bezeichnung | Geschwindigkeits-Zeitdiagramm

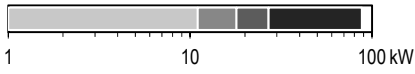
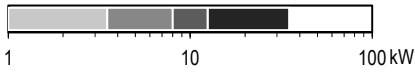
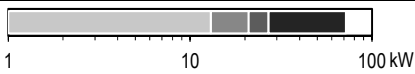

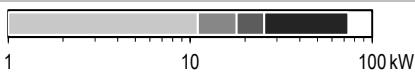
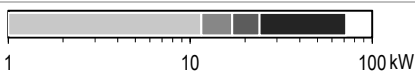
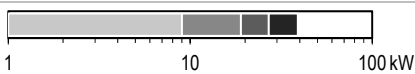
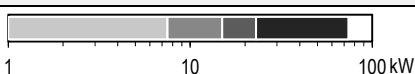
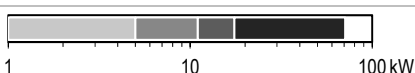
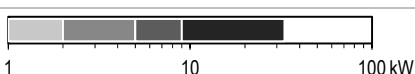
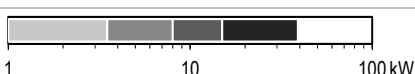


Charakterisierung der verwendeten Fahrzyklen.

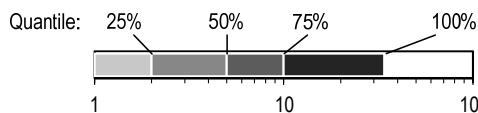
Kastengrafiken berücksichtigen in dieser Darstellung nur positive Leistungsanteile. Der mechanische Energieumsatz ist für positive und negative Zugkräfte angegeben. *ARTEMIS Motorway* wird in der Variante mit einer maximalen Geschwindigkeit von 130 km h^{-1} gewählt. Werte für ICV-G im Szenario „Standard“ mit einer Fahrzeugmasse von 1251 kg , einer Querspanfläche von $2,1 \text{ m}^2$ und einem c_w -Wert von $0,32$.

Bezeichnung	Mittlere Geschwindigkeit km h^{-1}	Mechanische Energie am Rad MJ (100km)^{-1}	Kastengrafik des Histogramms der Antriebsleistung
Fahrzyklengruppe „Städtisch“			
ARTEMIS <i>urban</i>	17,5	61,6; –52,8	
ECE	18,5	35,5; –23,4	
US FTP 72	31,3	41,4; –24,7	
HYZEM <i>urban</i>	22,3	51,2; –40,4	
Japan 08	24,3	40,1; –24,1	
MODEM <i>free flow urban</i>	23,1	56,8; –46,4	
MODEM <i>slow urban</i>	13,6	50,4; –41,6	
SFTP-SC03	34,6	45,4; –27,8	
WLTC, ver. 4.0 <i>low</i>	18,8	42,3; –31,7	
WLTC, ver. 4.0 <i>middle</i>	38,8	43,5; –27,3	
Fahrzyklengruppe „Überland“			
ARTEMIS <i>road</i>	57,0	45,0; –19,5	
EUDC	62,2	42,7; –10,2	
HYZEM <i>rural</i>	47,5	51,4; –27,5	
MODEM <i>road</i>	43,6	51,0; –28,2	

Fortsetzung der Tabelle: Charakterisierung der verwendeten Fahrzyklen.

Bezeichnung	Mittlere Geschwindigkeit km h^{-1}	Mechanische Energie am Rad MJ (100km)^{-1}	Kastengrafik des Histogramms der Antriebsleistung
Fahrzyklengruppe „Überland“			
SFTP-US06	77,3	66,0; -22,3	
WLTC, ver. 4.0 <i>high</i>	55,3	42,0; -15,0	
Fahrzyklengruppe „Autobahn“			
ARTEMIS <i>motorway (130)</i>	96,7	62,1; -10,3	
US Highway	77,2	37,4; -4,5	
HYZEM <i>highway</i>	91,9	58,7; -9,6	
MODEM <i>motorway</i>	101,5	55,7; -5,3	
WLTC, ver. 4.0 <i>very high</i>	90,0	56,5; -6,9	
Fahrzyklengruppe „Kombiniert“			
HYZEM	68,4	56,9; -14,6	
MODEM	46,4	53,8; -19,2	
MVEG	33,3	40,1; -15,0	
WLTC, ver. 4.0	46,3	47,5; -16,9	

Beispielhistogramm (MVEG)



ANHANG H: LEISTUNGS- UND BETRIEBSDATEN VON BATTERIEN

Anmerkung: Quellenangaben sind der Bibliographie auf Seite 149 zu entnehmen.

Energiedichte und spezifische Energie sind auf Zellebene proportional zur Kapazität [Ah] und dem Spannungsniveau [V]. Grundsätzliche Möglichkeiten der Erhöhung der Kapazität einer Zelle bestehen in der Optimierung der (i) Elektrodenlänge und -dicke, (ii) der Partikelgröße der aktiven Materialien, (iii) der Dicke des Separators und (iv) der Porosität bei porösen Elektroden [77, S. 399]. Die theoretische Kapazität einer Batterie hängt von den verwendeten Elektrodenmaterialien ab. Die theoretische Zellspannung wird durch die Standardleerlaufspannung der Elektroden bestimmt. Reale Zellspannungen liegen darunter [77, S. 399].

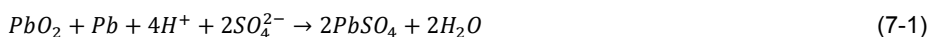
Die Betriebstemperatur hat einen besonderen Einfluss auf Leistungsdaten und Betriebssicherheit. Einerseits werden bei höheren Temperaturen Reaktionskinetik und Transportprozesse verbessert, andererseits können Alterungsprozesse und unerwünschte Nebenreaktionen begünstigt werden. Die thermische Stabilität verwendeter Materialien und die Konzentration der elektrochemisch aktiven Materialien sind daher Entwicklungs- und Optimierungskriterien [77, S. 399-400].

Für Anwendungen von Batterien in der mobilen Strombereitstellung ist die Lebensdauer auch bezüglich der Wirtschaftlichkeit von Bedeutung. Sie bestimmt die Häufigkeit der notwendigen Neuinvestition, da die Lebensdauer von Gesamtsystemen häufig größer als die der eingesetzten Batterien ist. Mit dem Betrieb von Batterien verbundene Einflussparameter auf die Lebensdauer liegen vor allem in der Temperatur und im Lade- und Entladeverhalten. Die beim Laden und Entladen auftretenden Ströme sind dabei abhängig von Auslegung und Betriebsweise des Systems. Hohe Ströme und hohe Temperaturen verstärken Alterungsprozesse [77, S. 400].

Im Folgenden werden Blei, Nickel-Metallhydrid und Lithium-Ionenbatterien näher erläutert.

Bleibatterien

Bleibatterien können entsprechend ihren Hauptanwendungen nach SLI¹- oder Starterbatterien und Traktionsbatterien für Elektrofahrzeuge unterschieden werden [77, S. 409]. Bezüglich der SLI-Batterie führt die Realisierung von Stopp-Startfunktion und rekuperativem Bremsen sowie ein zunehmender Ruhestromverbrauch in modernen Pkw auch zu erhöhten Anforderungen Batterieleistungsfähigkeit. Als Traktionsbatterien kommen heute zunehmend Nickel-Metallhydrid- und vor allem Lithium-Ionenbatterien zum Einsatz. Die Summenreaktion des Entladevorgang der Bleibatterie ist wie folgt [77, S. 409]:



¹ SLI: Starterbatterie (*Starting, lighting, ignition*)

Metallisches Blei wird an der Kathode, Bleioxid an der Anode verwendet. Als Separator-materialien kommen mikroporöse Gummi, Zellulose, gesintertes PVC oder Polyethylen und Mikroglasfaservlies zum Einsatz ([77, S. 409] und [129]).

Die Zellspannung wird mit $1,93\text{ V}$ angegeben und ist die höchste unter den Systemen mit wässrigem Elektrolyten [130, S. 1258]. Das theoretische Maximum der spezifischen Energie liegt bei 161 Wh kg^{-1} [131]. Nach [77, S. 411] haben Bleibatterien die geringste Selbstentladerate unter den Batterien mit Werten von 2 % bis 3 % pro Monat. Weitere Vorteile sind unter anderem geringe Herstellungskosten und gute Verfügbarkeit der Materialien. Der wässrige Elektrolyt trägt zu der im Vergleich zu anderen Technologien geringeren Energiedichte und spezifischen Energie bei. Nach [78, S. 251] werden an den Elektroden nur etwa 30 % bis 40 % der vorhandenen aktiven Massen elektrochemisch genutzt. Dadurch und durch weitere notwendige Bauteile reduziert sich die in technischen Systemen erzielte spezifische Energie auf 30 bis 40 Wh kg^{-1} [78, S. 251]. [131] gibt als typischen Wert 27 Wh kg^{-1} an.

Weiterentwickelte Bauformen von Bleibatterien sind sogenannte ventilregulierte Bleibatterien oder VRLA-Batterien (*valve regulated lead acid*, VRLA). Hier ist die Schwefelsäure in einem Gel (VRLA-Gel-Batterien) oder einem Vlies VRLA-AGM-Batterien (*absorbent glass mat*, AGM) gebunden [132].

Spezifische Energie und Leistung für Hochenergiebatterien des Typs VRLA-AGM in prismatischer Bauweise werden in [78, S. 252] mit 39 Wh kg^{-1} und 230 W kg^{-1} angegeben. Zugehörige Lebensdauerangaben sind 2 bis 6 Jahre beziehungsweise 300 Zyklen bezogen auf die Nennkapazität bei 20 % Entladetiefe. [54] benennt als Nachteil für die Anwendung als Komponente in Hybridantrieben die unbeständige dynamische Ladungsaufnahmefähigkeit (*Dynamic charge acceptance*, DCA). Danach sind größere Ladeströme vor allem nach starker Ladungsentnahme möglich. Da die Lade-/ Entladezyklen bei der Hybridanwendung aufgrund der Batterieauslegung vergleichsweise flach sind, führt die dann reduzierte DCA auch zu Nachteilen im Kraftstoffverbrauch. Nach Angaben in [54] reduziert sich ein gegenüber einem Referenzfahrzeug zu 100 % gesetzter Verbrauchsvorteil eines *Full-HEV* mit 20 kW_e auf etwa 78 % bei einer DCA von 6 C^1 und auf etwa 23 % bei einer DCA von nur noch $0,5\text{ C}$, wenn statt des *Full-HEV* ein *Medium-HEV* mit AGM-Batterien und 10 kW_e angenommen wird.

Nickel-Metallhydridbatterien

Nickel-Metallhydrid (Ni-MH)-Batterien werden vor allem in Kleingeräten und Elektrowerkzeugen eingesetzt; im höheren Leistungsbereich auch in der Elektrotraktion, beispielsweise im Toyota Prius. In einem Feldversuch in Frankreich werden seit Ende 2009

¹ Die in der Literatur übliche Angabe der C-Rate ist definiert als das Verhältnis des Lade- beziehungsweise Entladestroms $[A]$ zur Kapazität der Batterie $[Ah]$. Eine C-Rate von 1 C entspricht 1 A h^{-1} .

in hundert Fahrzeugen einer *Plug-in* Version des Toyota Prius Lithium-Ionenbatterien eingesetzt [133].

Bei Ni-MH-Batterien wird Wasserstoff anodenseitig in einer Metalllegierung gespeichert. Beim Entladen wird aus den bei der Wasserstoffoxidation entstehenden H^+ -Ionen und den OH^- -Ionen der als Elektrolyt fungierenden Kalilauge Wasser gebildet. Frei werdende Elektronen reduzieren an der Kathode Nickel unter Bildung von $Ni(OH)_2$ ausgehend von $NiO(OH)$. Die Summenreaktion lautet damit:



wobei M für Metalllegierung steht und der Entladevorgang nach rechts, [77, S. 414]) dargestellt ist. Die theoretische Ruhespannung liegt bei 1,32 V. Unter Einbeziehung des Formelumsatzes lässt sich die theoretische spezifische Energie mit $214,3 \text{ Wh kg}^{-1}$ angeben [78, S. 264]. Optimierte Zellen erzielen heute zwischen 45 und 75 Wh kg^{-1} [78, S. 265].

Ni-MH-Batterien weisen ebenfalls den oben beschriebenen Memory-Effekt auf, bei dem die Entladespannung bei dauerhaftem Betrieb im Teilladungsbereich absinkt. Durch Vollladung wird der Effekt wieder aufgehoben. In [78, S. 269] beschriebener wesentlicher Alterungseffekt ist das Aufbrechen der Speicherlegierungen an der Anode, was zu einer Oberflächenvergrößerung mit damit verbundener vermehrter Elektrolytaufnahme führt. Im Ergebnis trocknet der Separator aus, was den Innenwiderstand erhöht. Dieser Effekt tritt bei Entladetiefen von mehr als 10 % auf. Bei einer Entladetiefe von nur 3 % sind Lebensdauern von bis zu 300.000 Zyklen möglich [78, S. 265].

Lithium-Ionenbatterien

Aufgrund seiner chemisch-physikalischen Eigenschaften ist Lithium für hohe spezifische Energien geeignet: Zu diesen Eigenschaften zählen seine geringe Dichte von $0,53 \text{ g cm}^{-3}$ und sein geringes Atomgewicht von 7 g mol^{-1} sowie das dem Betrag nach höchste Standardpotential von $-3,05 \text{ V}$. Im Gegensatz zu anderen Batterietypen gibt es bei Lithium-Ionen (Li-Ionen)-Batterien eine Vielzahl möglicher Materialpaarungen [134, S. 2]. Diese sind Gegenstand intensiver Forschung und Entwicklung, wobei die Anforderungsprofile der Einsatzgebiete mitbestimmend für die Auswahl der Materialpaarungen sind. Es lassen sich 2-, 3- und 4-Voltsysteme realisieren. Die höheren Zellspannungen erlauben bei gegebener Betriebsspannung eine verringerte Zellenzahl gegenüber anderen Technologien.

Die Summengleichung kann – mit dem Entladevorgang nach rechts – vereinfacht wie folgt dargestellt werden [77, S. 415]:



Lithium-Ionen werden in diesem Beispiel demnach beim Entladen aus dem Graphit herausgelöst und bewegen sich in die Schichtstruktur des Lithiummetalloxids.

Hinsichtlich der spezifischen Energie von Batterien ist neben der mittleren Spannung die spezifische Kapazität der Aktivmassen an den Elektroden von besonderer Bedeutung. Sie

beträgt anodenseitig maximal 3860 mAh g^{-1} für metallisches Lithium. Da üblicherweise ein sogenanntes Wirtsgitter zur Lithiumeinlagerung benötigt wird, liegen technisch realisierte Werte deutlich darunter: für Graphit zum Beispiel gilt ein theoretischer Wert von 372 mAh g^{-1} [76, S. 110]. In Lithiumlegierungen können spezifische Kapazitäten vergleichbar zu der von metallischem Lithium erreicht werden. Nachteil ist hier allerdings, dass Lade- und Entladevorgänge zu starken Volumenänderungen bis ca. 400 % führen [76, S. 111]. Bei Graphit liegt die Volumenänderung bei nur etwa 9 % [76, S. 110]. Große Volumenänderungen stellen eine besondere Herausforderung bei der Gestaltung der Elektrodenstrukturen dar. Weitere Möglichkeiten für Anodenmaterialien sind [76, S. 114] zu entnehmen. Spezifische Kapazitäten für Kathodenmaterialien liegen zum Beispiel bei 150 mAh g^{-1} für Lithiumcobaltdioxid (LiCoO_2), 170 mAh g^{-1} für Lithiumnickeloxid (LiNiO_2) und 160 mAh g^{-1} für Lithiumeisenphosphat (LiFePO_4) [76, S. 118]. Werden für eine Abschätzung der spezifischen Energie der oben genannte theoretische Wert für Graphit von 372 mAh g^{-1} und für LiFePO_4 von 160 mAh g^{-1} gewählt dann lässt sich bei 3,4 V mittlerer Spannung von LiFePO_4 gegen Li/Li^+ die nur auf die Aktivmassen bezogene spezifische Energie mit 380 Wh kg^{-1} angeben. Die Massen aller weiteren Zell- und Modulkomponenten sind dabei nicht berücksichtigt.

In heutigen tragbaren elektronischen Geräten ist LiCoO_2 als Aktivmasse an der Kathode gebräuchlich. In diesem System beträgt die maximale spezifische Energie 420 Wh kg^{-1} bei einer Ruhespannung von 4,2 V [78, S. 271]. Auch an der Kathode können Lithium-Metalloxide zur Anwendung kommen. Die Eignung zahlreicher Materialpaarungen wird erforscht [129]. Als Elektronenableiter werden auf der Anodenseite Kupfer- und auf der Kathodenseite Aluminiumfolien verwendet [76, S. 105]. Als Elektrolyt kommen Lithiumsalze in einem Lösemittelgemisch, darunter LiPF_6 , LiASF_6 und LiClO_4 , zur Anwendung. Separatoren sind aus Polypropylen oder Polyethylen. Der Elektrolyt enthält zudem eine Reihe von funktionalisierenden Additiven, die unter anderem die in der Regel nicht vermeidbare Ausbildung der Grenzschicht zwischen Anode und Elektrolyt (*Solid electrolyte interface*, SEI) beeinflussen, die Entflammbarkeit verringern und die Überladesicherheit verbessern.

Li-Ionen-Batterien werden heute mit Kapazitäten von 0,55 bis 3 Ah in zylindrischen oder flachen Bauformen angeboten [130]. Vor- und Nachteile werden in [78] diskutiert; unter anderem weisen flache Batterien eine bessere Wärmeabfuhr auf, während runde Bauformen eine höhere Dichtigkeit und Druckfestigkeit haben.

Gegenüber Bleibatterien werden in [134] als Vorteile unter anderem angeführt: größere Zyklenfestigkeit, höhere Energie- und Leistungsdichte sowie höhere spezifische Energie und spezifische Leistung. Sicherheitstechnisch sind Li-Ionen-Batterien wegen der reaktiven Reaktionspartner und des brennbaren Elektrolyten anspruchsvoller. Maßnahmen für einen sicheren Betrieb beziehen sich auf (i) die Auswahl der verwendeten Materialien, (ii) das Moduldesign, (iii) das Batteriemanagement, das elektrische und thermische Überlastungen vermeiden soll [78, S. 275f], sowie auf den Schutz gegen mechanische Beschädigung.

Die komplexen Alterungsmechanismen in Li-Ionen-Batterien sind in Vetter et al. (2005), [135] sehr detailliert beschrieben. Anodenseitig spielt vor allem die Ausbildung des SEI-Films eine Rolle, die einerseits den Innenwiderstand erhöht andererseits zu einem Verlust an aktiven

Materialien führt. Ebenso spielen Volumenänderungen bei Lade- und Entladevorgängen eine Rolle und führen ebenfalls zu Materialverlust. Kathodenseitig sind Alterungs- und Abbauprozesse bei den verwendeten Materialien von Bedeutung, beispielsweise die Oxidation von Elektrolytbestandteilen. Beschriebene Effekte hängen darüber hinaus auch von den verwendeten Materialien ab. Als vorteilhaft für die Lebensdauer wird in [78, S. 276] der Betrieb bei mittleren Ladezuständen mit geringer Entladetiefe beschrieben.

ANHANG I: ERGEBNISVEKTOR DER SIMULATIONSMODELLE

Anmerkung: Alle Energiewerte mit der Einheit $[MJ]$ ($100km$)⁻¹, Zeitwerte mit der Einheit $[s]$, Strecken mit der Einheit $[m]$.

Nr.	Bezeichnung	Erläuterung
1	$E_{AT,pos}^m$	Mechanische Energie am Achsantrieb (AT) in positiver Zugkrafttrichtung
2	$E_{AT,neg}^m$	Mechanische Energie am AT in negativer Zugkrafttrichtung
3	$E_{BTB,neg}^m$	Mechanische Energie der Betriebsbremse
4	$E_{GTE,pos}^m$	Mechanische Energie am Getriebeeingang (GTE) in positiver Zugkrafttrichtung
5	$E_{GTE,neg}^m$	Mechanische Energie am GTE in negativer Zugkrafttrichtung
6	$E_{VM,pos}^m$	Mechanische Energie des Verbrennungsmotors (VM) in positiver Zugkrafttrichtung
7	$E_{VM,neg}^m$	Mechanische Energie des VM in negativer Zugkrafttrichtung (Schubbetrieb)
8	$E_{VM,aux,pos}^m$	Mechanische Energie der Elektromaschine bei positiver Zugkrafttrichtung
9	$E_{VM,aux,neg}^m$	Mechanische Energie der Elektromaschine bei negativer Zugkrafttrichtung (nur ICV)
10	E_{VM}^{th}	Thermische Energie des VM am Ort der Nutzung in der Kabine
11	E_{VM}^{ch}	Chemische Energie des im VM umgesetzten Kraftstoffs
12	$E_{EM1,Mot}^m$	Mechanische Energie der Elektromaschine im Motorbetrieb
13	$E_{EM1,Gen}^m$	Mechanische Energie der Elektromaschine im Generatorbetrieb (gesamt)
14	$E_{EM1,Rek}^m$	Mechanische Energie der Elektromaschine im Generatorbetrieb (nur Rekuperation)
15	$E_{EM1,Mot}^e$	Elektrische Energie der Elektromaschine im Motorbetrieb
16	$E_{EM1,Gen}^e$	Elektrische Energie der Elektromaschine im Generatorbetrieb (gesamt)
17	$E_{EM1,Gen,Rek}^e$	Elektrische Energie der Elektromaschine im Generatorbetrieb (nur Rekuperation)
18	E_{EM1}^{th}	Thermische Energie der Elektromaschine am Ort der Nutzung in der Kabine
19–25		Nicht genutzt (Vorbereitung für Konzepte mit zweiter Elektromaschine)
26	$E_{aux,14V}^e$	Elektrische Energie des 14 V-Bordnetzes
27	$E_{aux,14V,HS}^e$	Elektrische Energie des 14 V-Bordnetzes bezogen auf Hochspannungsnetz (konzeptspezifisch)
28	E_{Klim}^e	Zur Fahrzeugklimatisierung erforderliche Energie (konzeptspezifisch)
29	$E_{Klim,res}^e$	Residualleistung der Kabinenklimatisierung (nach Abzug der verfügbaren Restwärme, Nr. 10, 18, 37)
30	$E_{HSN,pos}^e$	Elektrische Energie der Batterieentladung, netto: mit Gleichspannungswandler- (GSW-) verlusten
31	$E_{HSN,neg}^e$	Elektrische Energie der Batterieladung, brutto (ohne GSW-Verluste)
32	$E_{Batt,etl}^e$	Elektrische Energie der Batterieentladung, brutto (mit GSW-Verlusten)
33	$E_{Batt,ldn}^e$	Elektrische Energie der Batterieladung, netto (ohne GSW-Verluste)
34	$E_{BZ,brt}^e$	Elektrische Energie des Brennstoffzellensystems (BZS), brutto (ohne GSW-Verluste)
35	$E_{BZ,net}^e$	Elektrische Energie des BZS, netto (mit Gleichspannungswandlerverlusten)
36	$E_{BZ,aux,14V}^e$	Elektrische Energie der 14 V-Nebenverbraucher des Brennstoffzellensystems
37	$E_{BZ,aux,HSN}^e$	Elektrische Energie der Hochspannungsnebenverbraucher des Brennstoffzellensystems
38	E_{BZS}^{th}	Thermische Energie des BZS am Ort der Nutzung in der Kabine
39	E_{BZS}^{ch}	Chemische Energie des im BZS umgesetzten Wasserstoffs
40	t	Zeit
41	s	Zurückgelegte Strecke

ANHANG J:

MASSEN DER ANTRIEBSKOMPONENTEN

Szenario	Konzept, Segment	m_{Basis} [kg]	m_{GT} [kg]	m_{VM} [kg]	m_{EM} [kg]	m_{Batt} [kg]	m_{BZS} [kg]	m_{H2Tank} [kg]	m_F [kg]
„Standard“	ICV-G, A	800	36	121	N. A.	8	N. A.	N. A.	996
	ICV-D, A	840	45	124	N. A.	8	N. A.	N. A.	1044
	ICV-G, C	1000	45	160	N. A.	8	N. A.	N. A.	1251
	ICV-D, C	1050	57	165	N. A.	8	N. A.	N. A.	1312
„Zukunft“	ICV-G, A	720	33	101	N. A.	5	N. A.	N. A.	889
	ICV-D, A	760	42	104	N. A.	5	N. A.	N. A.	936
	ICV-G, C	900	42	135	N. A.	5	N. A.	N. A.	1117
	ICV-D, C	950	53	138	N. A.	5	N. A.	N. A.	1175
„Standard“	PAH-G, A	840	56	87	22	25	N. A.	N. A.	1048
	PAH-D, A	880	62	91	20	26	N. A.	N. A.	1098
	PAH-G, C	1050	68	116	29	32	N. A.	N. A.	1319
	PAH-D, C	1100	69	107	23	31	N. A.	N. A.	1353
„Zukunft“	PAH-G, A	760	53	72	18	17	N. A.	N. A.	936
	PAH-D, A	800	58	75	16	17	N. A.	N. A.	984
	PAH-G, C	950	64	97	24	22	N. A.	N. A.	1177
	PAH-D, C	1000	73	106	23	22	N. A.	N. A.	1248
„Standard“	BEV, A	800	32	N. A.	74	226	N. A.	N. A.	1165
	BEV, C	1000	37	N. A.	90	251	N. A.	N. A.	1416
„Zukunft“	BEV, A	720	29	N. A.	58	120	N. A.	N. A.	948
	BEV, C	900	35	N. A.	74	132	N. A.	N. A.	1164
„Standard“	FCV, A	800	33	N. A.	74	44	164	80	1235
	FCV, C	1000	40	N. A.	99	58	259	93	1603
„Zukunft“	FCV, A	720	29	N. A.	57	30	92	61	1016
	FCV, C	900	35	N. A.	76	39	145	69	1300

ANHANG K:

ERGEBNISSE DER KRAFTSTOFFVERBRAUCHSBESTIMMUNG

Teil 1: Verbrennungsmotor-Pkw (ICV)

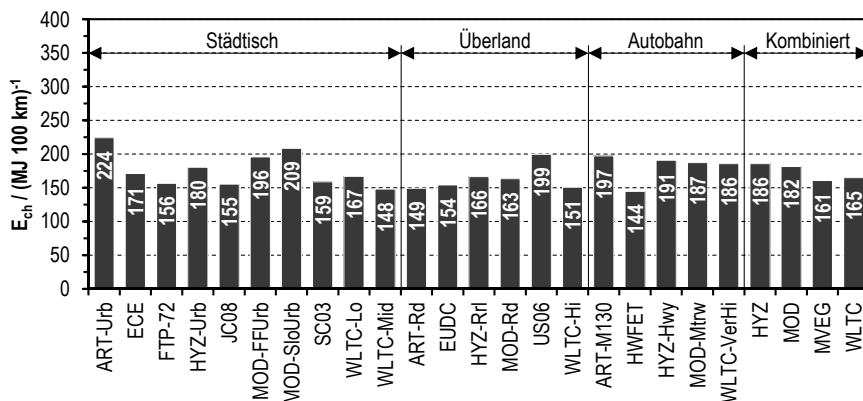
Szenario „Standard“, Kraftstoff Benzin

Kraftstoffverbrauchswerte von ICV-G des A-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Nur Grundlast“ (GRL), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; **FreeUrb:** Free flow urban; **Highw:** Highway; **HYZ:** HYZEM; **MOD:** MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); **Rur:** Rural; **SlowUrb:** Slow urban; **Urb:** Urban

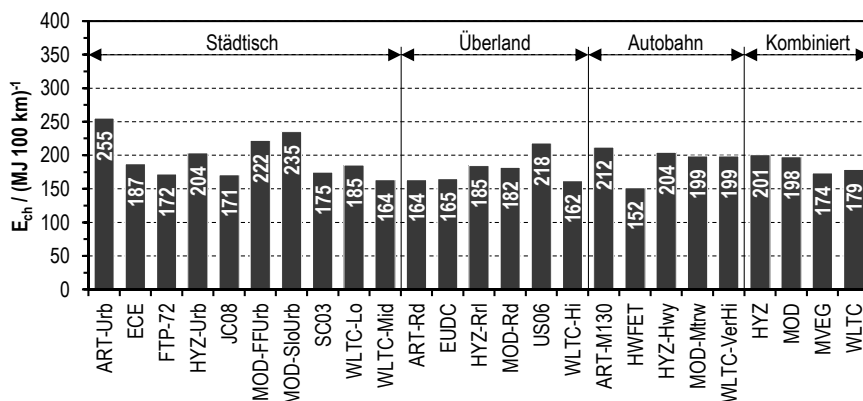


Kraftstoffverbrauchswerte von ICV-G des C-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Nur Grundlast“ (GRL), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; **FreeUrb:** Free flow urban; **Highw:** Highway; **HYZ:** HYZEM; **MOD:** MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); **Rur:** Rural; **SlowUrb:** Slow urban; **Urb:** Urban

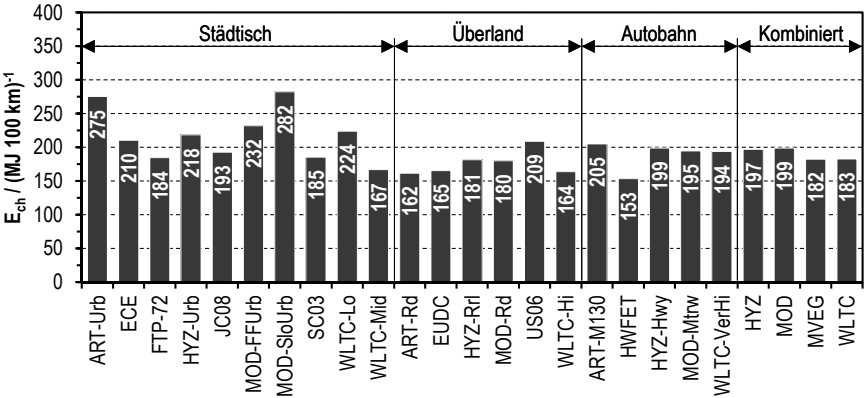


Kraftstoffverbrauchswerte von ICV-G des A-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Keine Klimatisierung“ (KKL), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

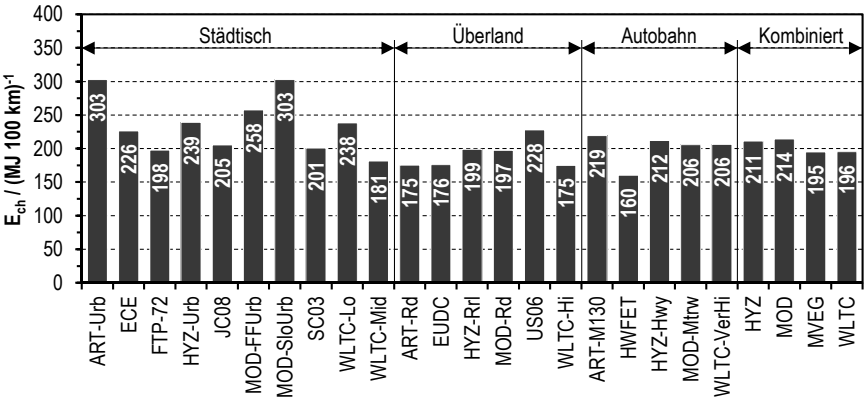


Kraftstoffverbrauchswerte von ICV-G des C-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Keine Klimatisierung“ (KKL), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

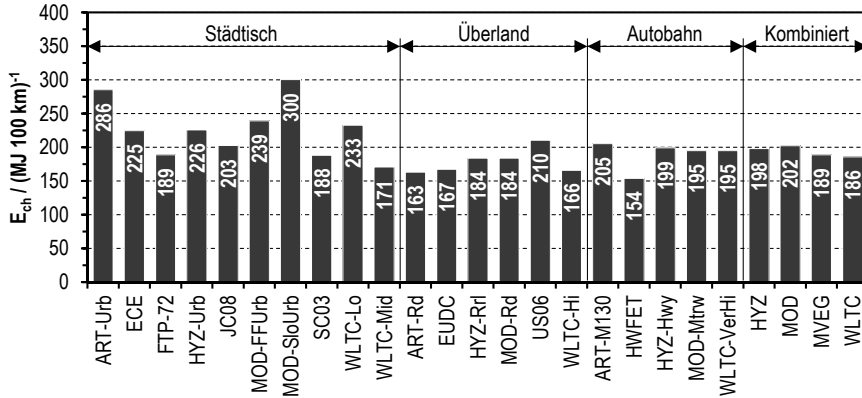


Kraftstoffverbrauchswerte von ICV-G des A-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Frosttag“ (FRT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; **FreeUrb**: Free flow urban; **Highw**: Highway; **HYZ**: HYZEM; **MOD**: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); **Rur**: Rural; **SlowUrb**: Slow urban; **Urb**: Urban

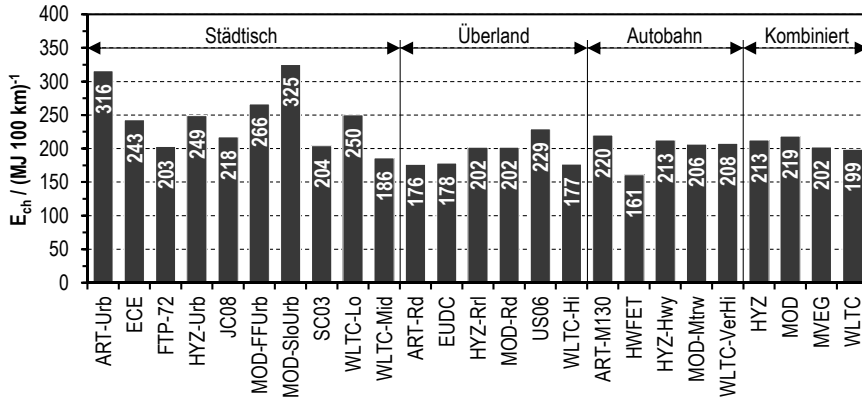


Kraftstoffverbrauchswerte von ICV-G des C-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Frosttag“ (FRT), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; **FreeUrb**: Free flow urban; **Highw**: Highway; **HYZ**: HYZEM; **MOD**: MODEM;

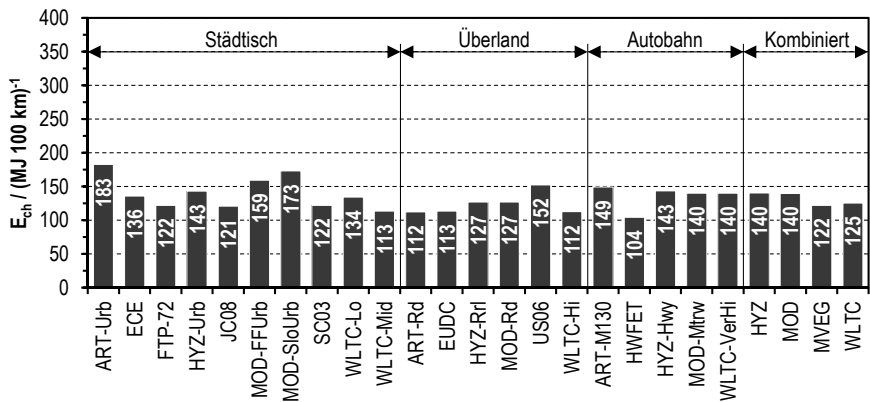
Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); **Rur**: Rural; **SlowUrb**: Slow urban; **Urb**: Urban



Szenario „Standard“, Kraftstoff Diesel

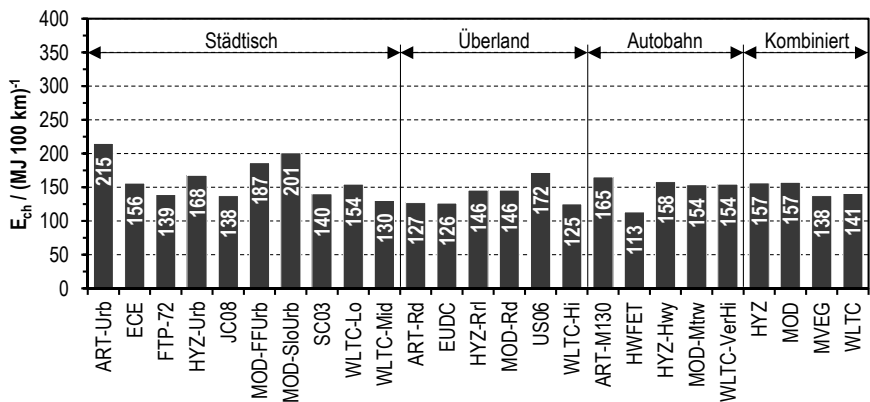
Kraftstoffverbrauchswerte von ICV-D des A-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Nur Grundlast“ (GRL), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113
ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;
Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban



Kraftstoffverbrauchswerte von ICV-D des C-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Nur Grundlast“ (GRL), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113
ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;
Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

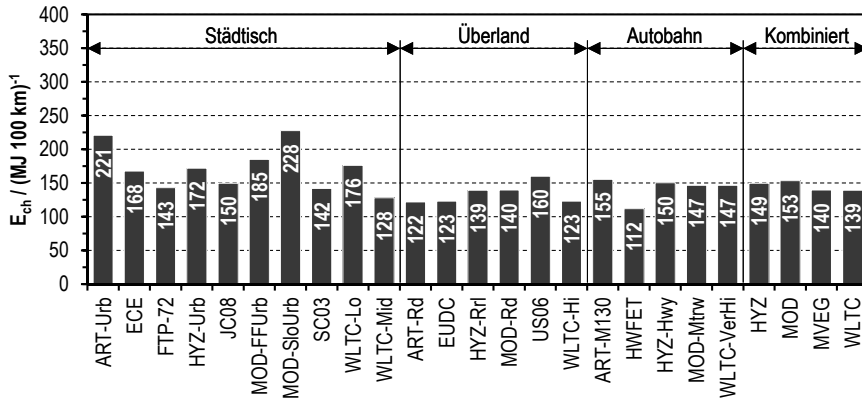


Kraftstoffverbrauchswerte von ICV-D des A-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Keine Klimatisierung“ (KKL), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART: ARTEMIS; **FreeUrb:** Free flow urban; **Highw:** Highway; **HYZ:** HYZEM; **MOD:** MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); **Rur:** Rural; **SlowUrb:** Slow urban; **Urb:** Urban

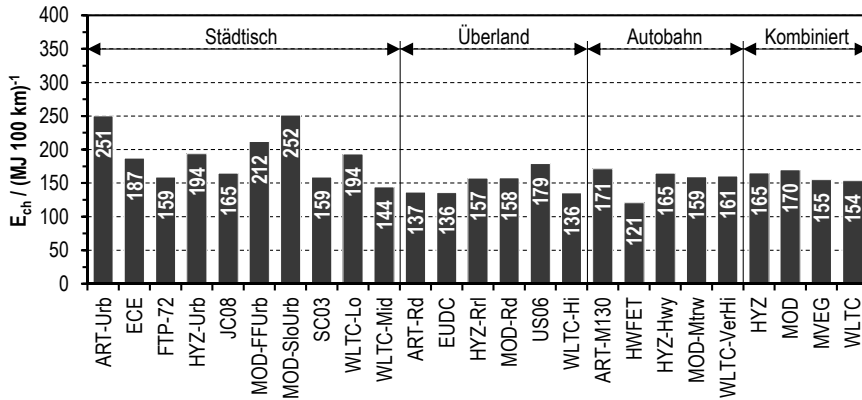


Kraftstoffverbrauchswerte von ICV-D des C-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Keine Klimatisierung“ (KKL), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113

ART: ARTEMIS; **FreeUrb:** Free flow urban; **Highw:** Highway; **HYZ:** HYZEM; **MOD:** MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); **Rur:** Rural; **SlowUrb:** Slow urban; **Urb:** Urban

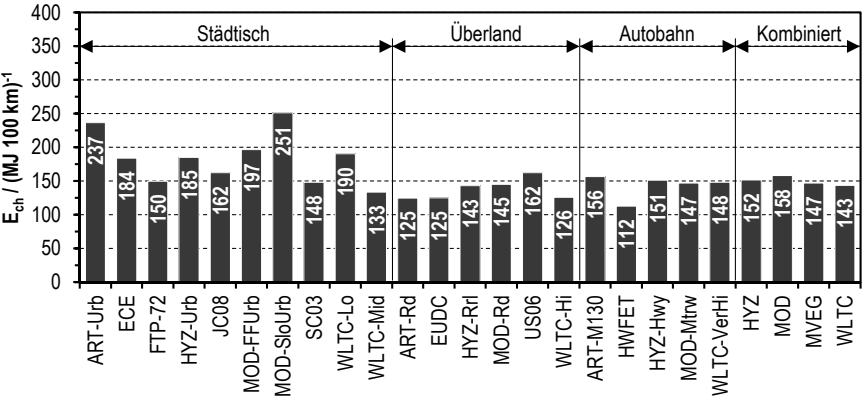


Kraftstoffverbrauchswerte von ICV-D des A-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Frosttag“ (FRT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

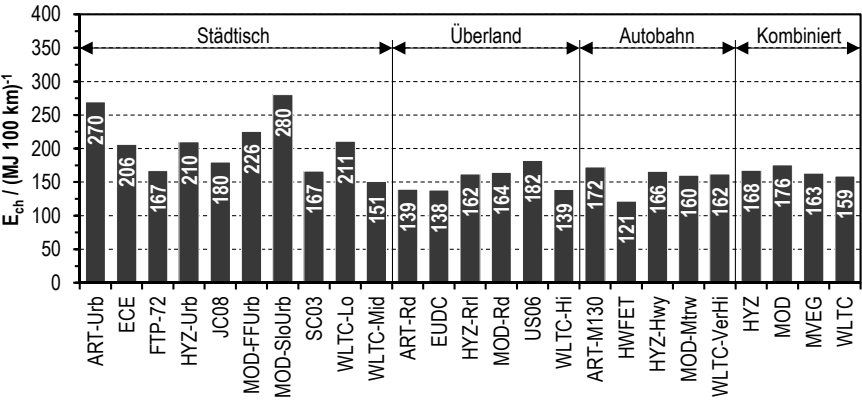


Kraftstoffverbrauchswerte von ICV-D des C-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Frosttag“ (FRT), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban



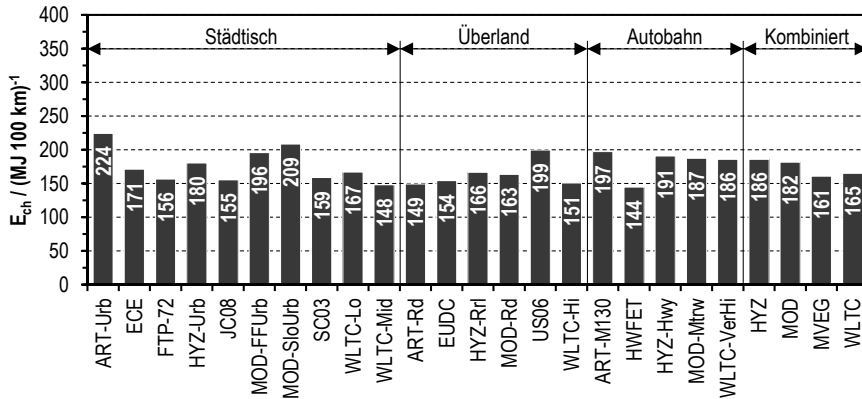
Szenario „Zukunft“, Kraftstoff Benzin

Kraftstoffverbrauchswerte von ICV-G des A-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Nur Grundlast“ (GRL), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; **FreeUrb**: Free flow urban; **Highw**: Highway; **HYZ**: HYZEM; **MOD**: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); **Rur**: Rural; **SlowUrb**: Slow urban; **Urb**: Urban

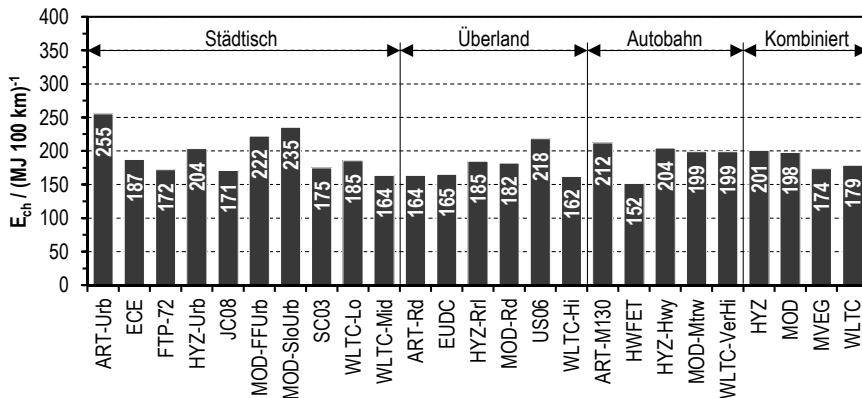


Kraftstoffverbrauchswerte von ICV-G des C-Segments im Szenario „Zukunft“.

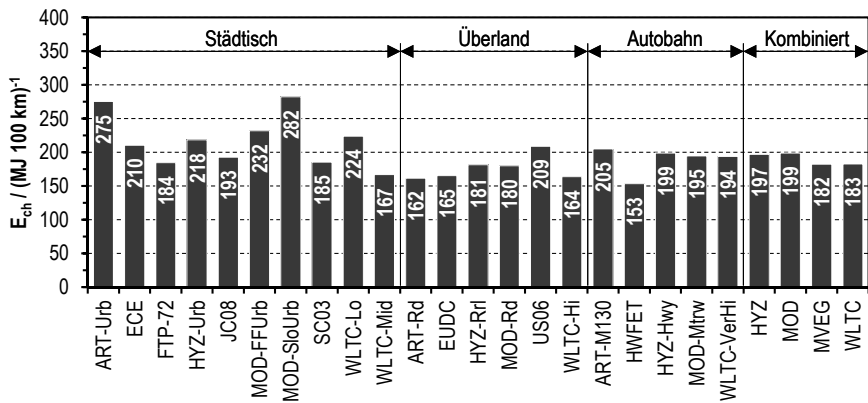
Lastfall: „Nur Grundlast“ (GRL), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; **FreeUrb**: Free flow urban; **Highw**: Highway; **HYZ**: HYZEM; **MOD**: MODEM;

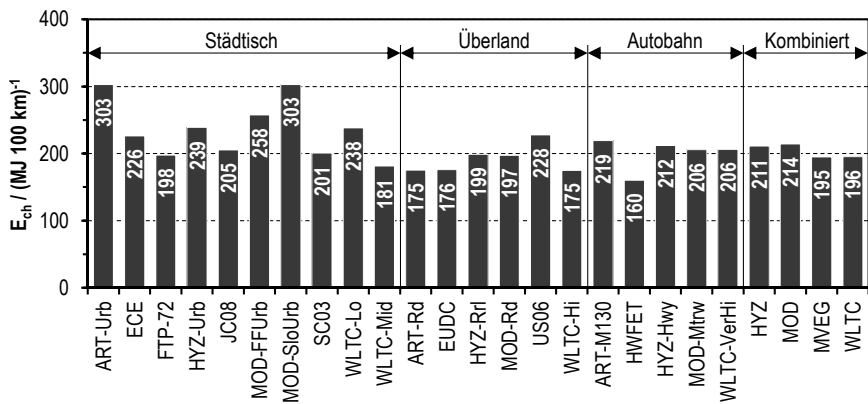
Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); **Rur**: Rural; **SlowUrb**: Slow urban; **Urb**: Urban



Kraftstoffverbrauchswerte von ICV-G des A-Segments im Szenario „Zukunft“.
Lastfall: „Keine Klimatisierung“ (KKL), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113
ART.: ARTEMIS; **FreeUrb:** Free flow urban; **Highw:** Highway; **HYZ:** HYZEM; **MOD:** MODEM;
Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); **Rur:** Rural; **SlowUrb:** Slow urban; **Urb:** Urban



Kraftstoffverbrauchswerte von ICV-G des C-Segments im Szenario „Zukunft“.
Lastfall: „Keine Klimatisierung“ (KKL), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113
ART.: ARTEMIS; **FreeUrb:** Free flow urban; **Highw:** Highway; **HYZ:** HYZEM; **MOD:** MODEM;
Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); **Rur:** Rural; **SlowUrb:** Slow urban; **Urb:** Urban

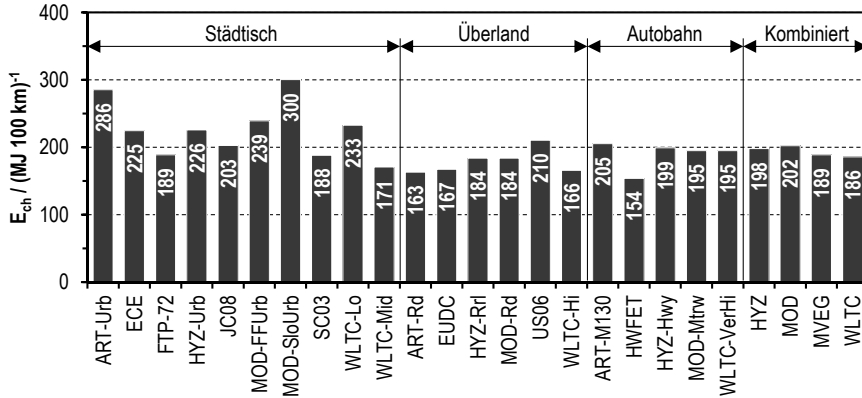


Kraftstoffverbrauchswerte von ICV-G des A-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Frosttag“ (FRT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART: ARTEMIS; **FreeUrb:** Free flow urban; **Highw:** Highway; **HYZ:** HYZEM; **MOD:** MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); **Rur:** Rural; **SlowUrb:** Slow urban; **Urb:** Urban

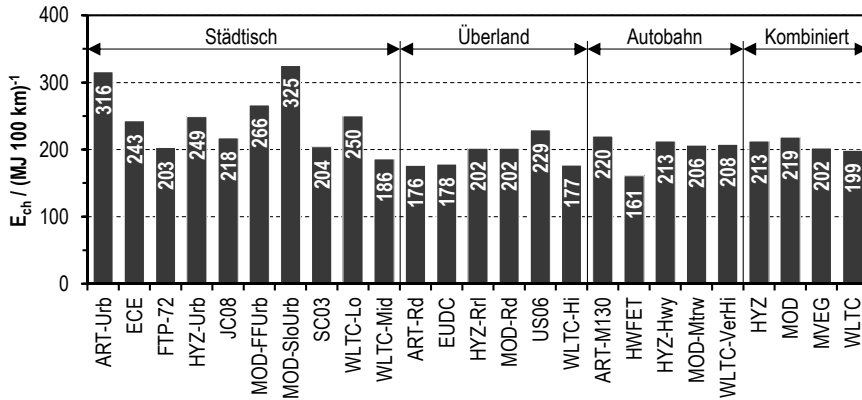


Kraftstoffverbrauchswerte von ICV-G des C-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Frosttag“ (FRT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART: ARTEMIS; **FreeUrb:** Free flow urban; **Highw:** Highway; **HYZ:** HYZEM; **MOD:** MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); **Rur:** Rural; **SlowUrb:** Slow urban; **Urb:** Urban



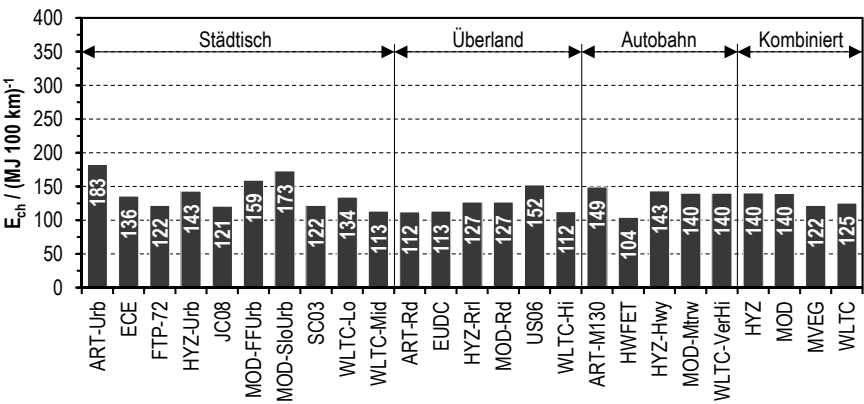
Szenario „Zukunft“, Kraftstoff Diesel

Kraftstoffverbrauchswerte von ICV-D des A-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Nur Grundlast“ (GRL), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

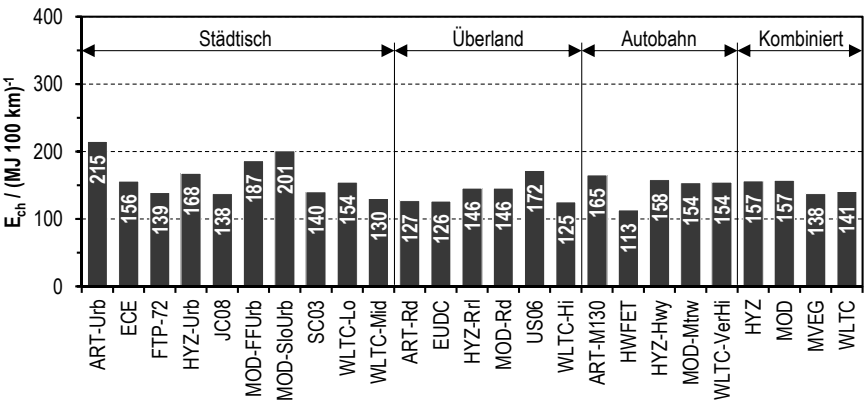


Kraftstoffverbrauchswerte von ICV-D des C-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Nur Grundlast“ (GRL), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

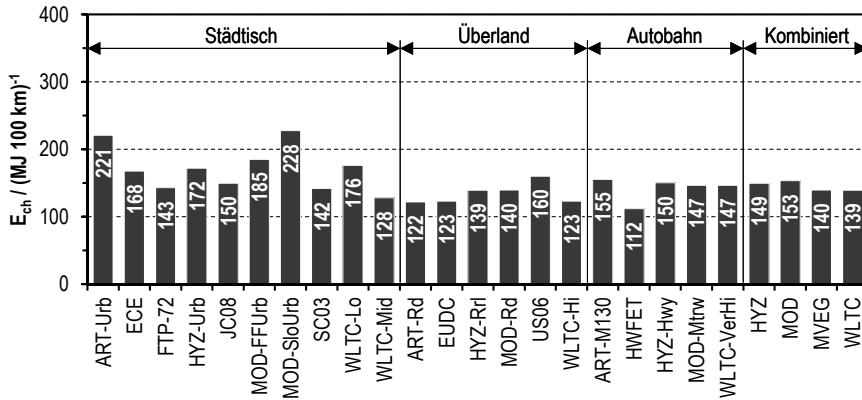


Kraftstoffverbrauchswerte von ICV-D des A-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Keine Klimatisierung“ (KKL), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; **FreeUrb:** Free flow urban; **Highw:** Highway; **HYZ:** HYZEM; **MOD:** MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); **Rur:** Rural; **SlowUrb:** Slow urban; **Urb:** Urban

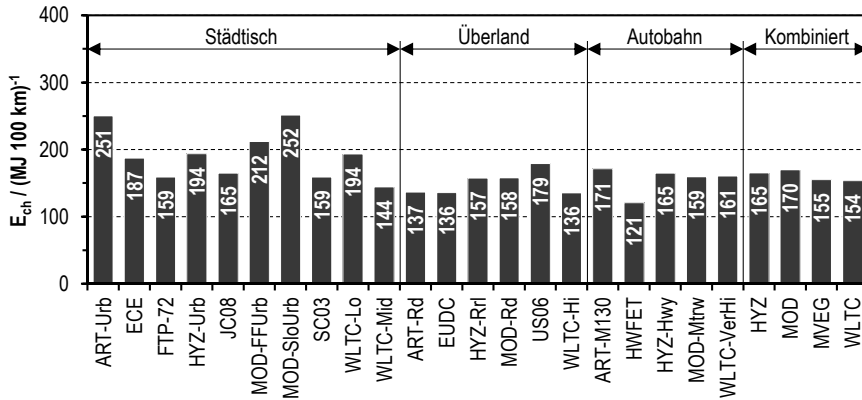


Kraftstoffverbrauchswerte von ICV-D des C-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Keine Klimatisierung“ (KKL), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; **FreeUrb:** Free flow urban; **Highw:** Highway; **HYZ:** HYZEM; **MOD:** MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); **Rur:** Rural; **SlowUrb:** Slow urban; **Urb:** Urban

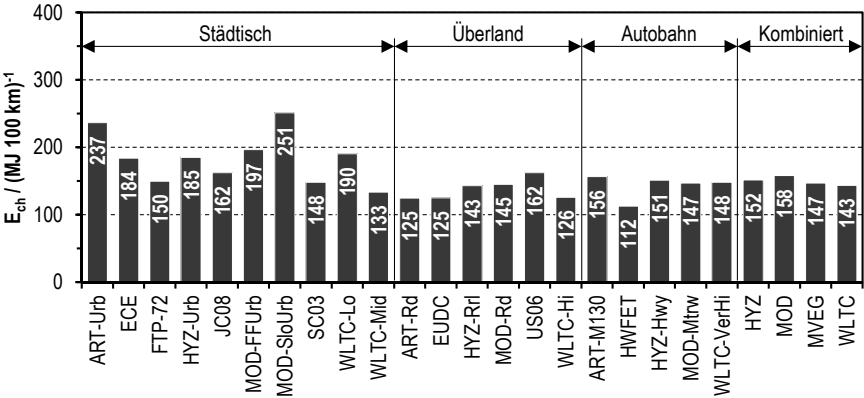


Kraftstoffverbrauchswerte von ICV-D des A-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Frosttag“ (FRT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

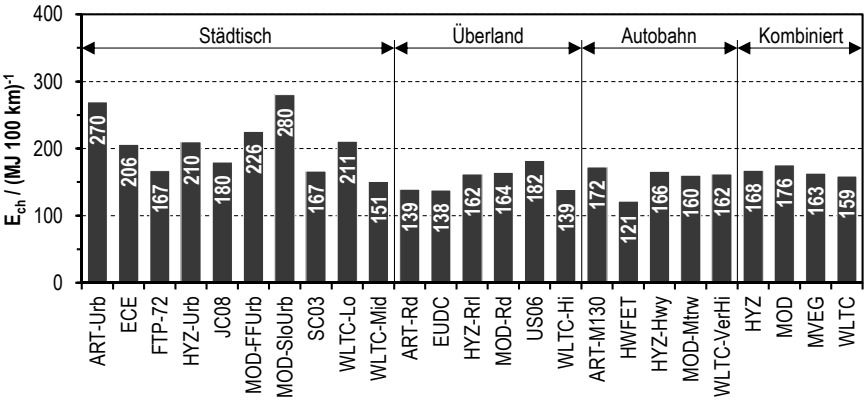


Kraftstoffverbrauchswerte von ICV-D des C-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Frosttag“ (FRT), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban



Teil 2: Parallelhybrid-Pkw (PAH)

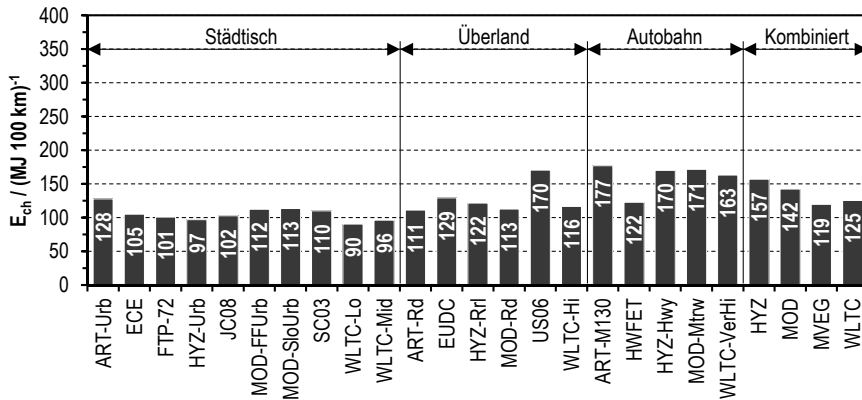
Szenario „Standard“, Kraftstoff Benzin

Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-G des A-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Nur Grundlast“ (GRL), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

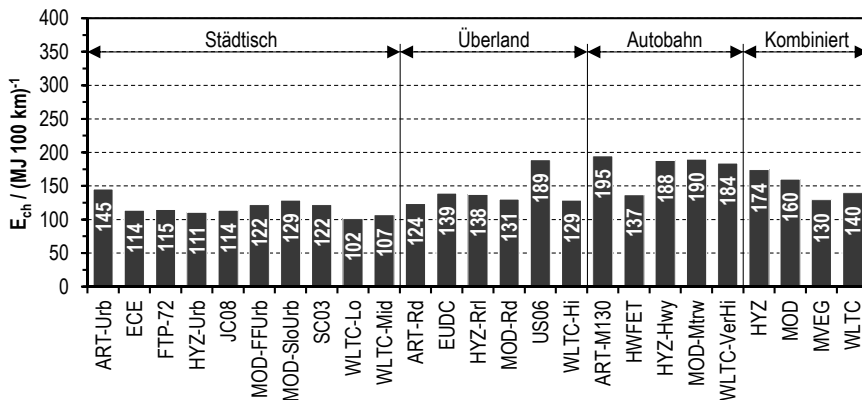


Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-G des C-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Nur Grundlast“ (GRL), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

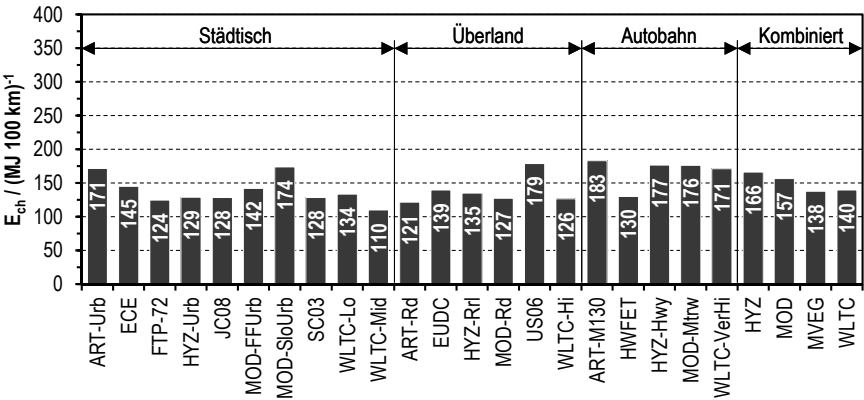


Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-G des A-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Keine Klimatisierung“ (KKL), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

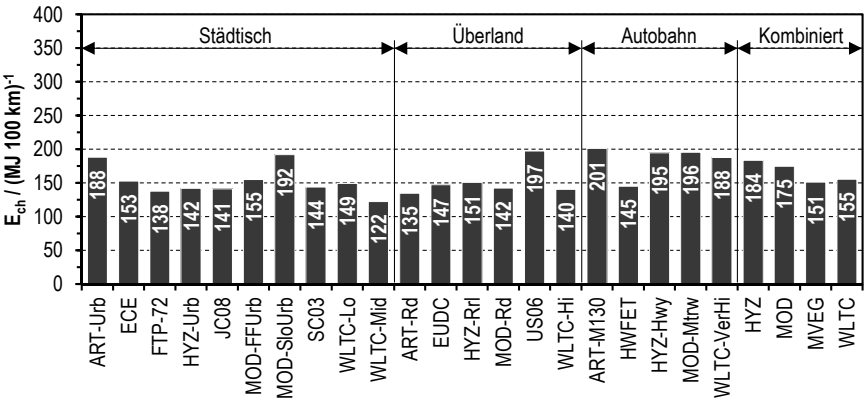


Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-G des C-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Keine Klimatisierung“ (KKL), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

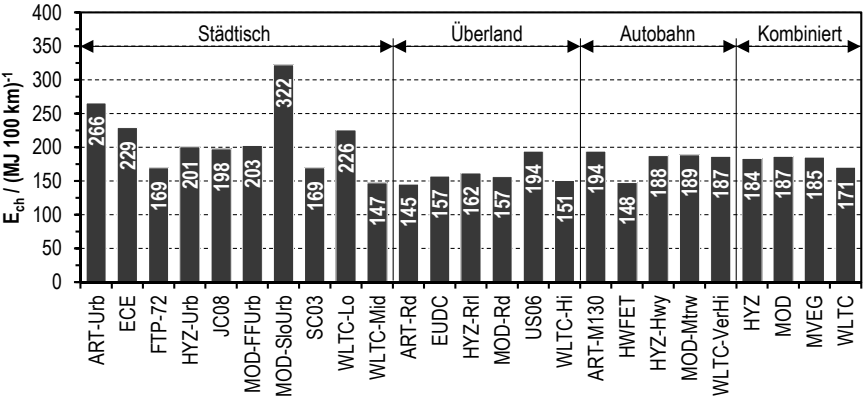


Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-G des A-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Frosttag“ (FRT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

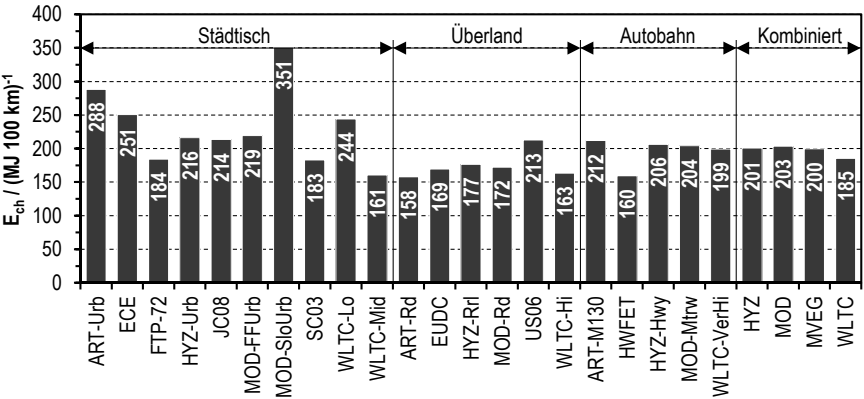


Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-G des C-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Frosttag“ (FRT), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113

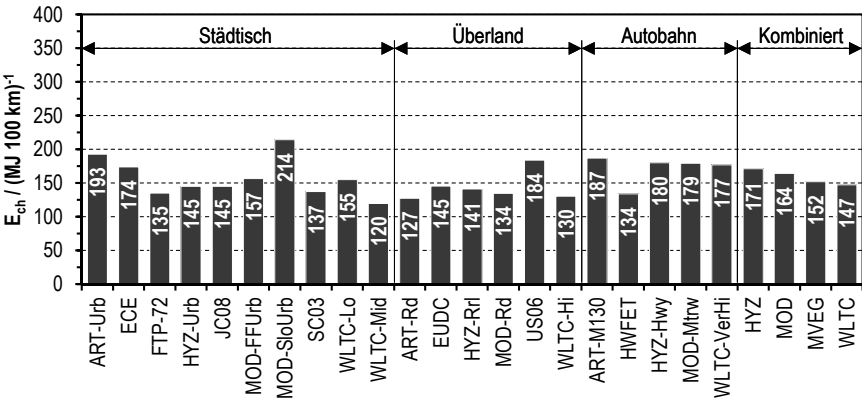
ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban



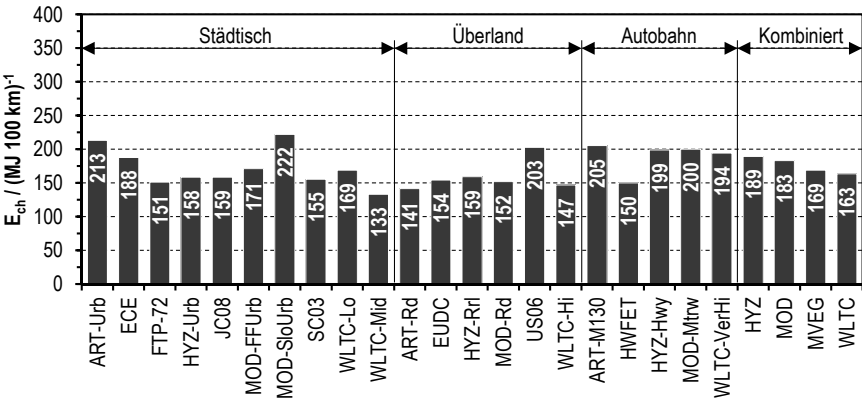
Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-G des A-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Sommertag“ (SOT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113
ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;
Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban



Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-G des C-Segments im Szenario „Standard“.

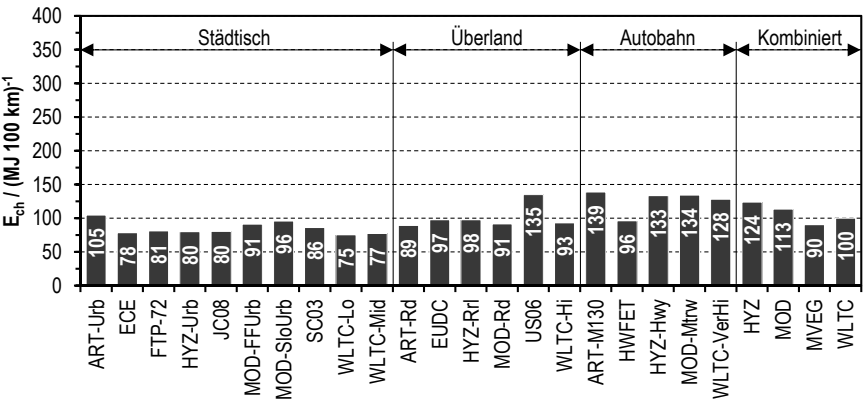
Lastfall: „Sommertag“ (SOT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113
ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;
Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban



Szenario „Standard“, Kraftstoff Diesel

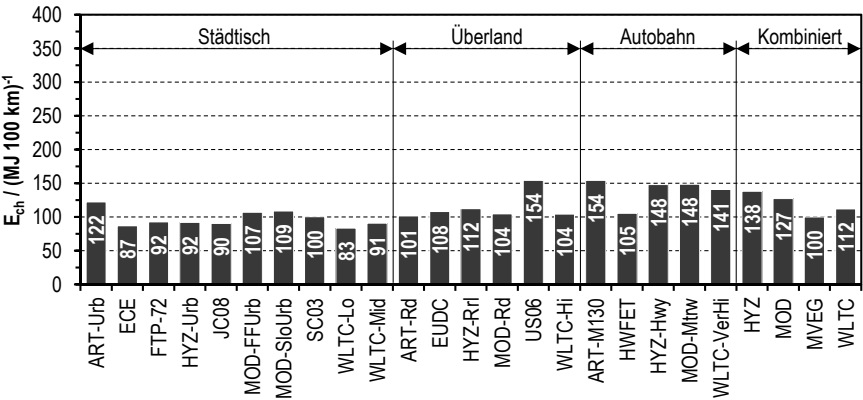
Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-D des A-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Nur Grundlast“ (GRL), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113
ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;
Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban



Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-D des C-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Nur Grundlast“ (GRL), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113
ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;
Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

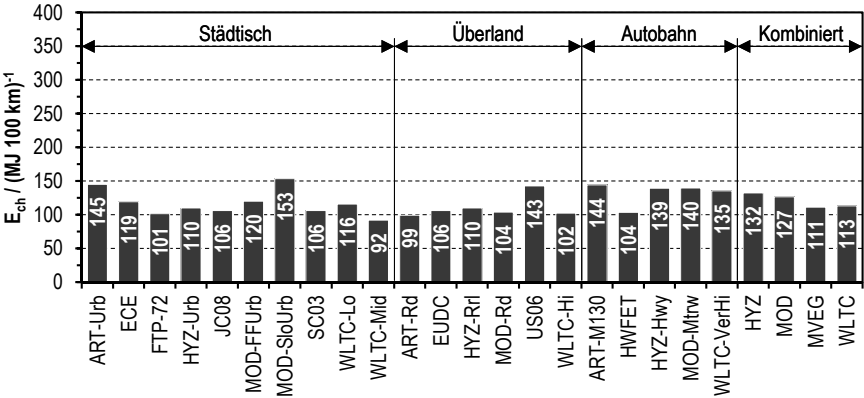


Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-D des A-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Keine Klimatisierung“ (KKL), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

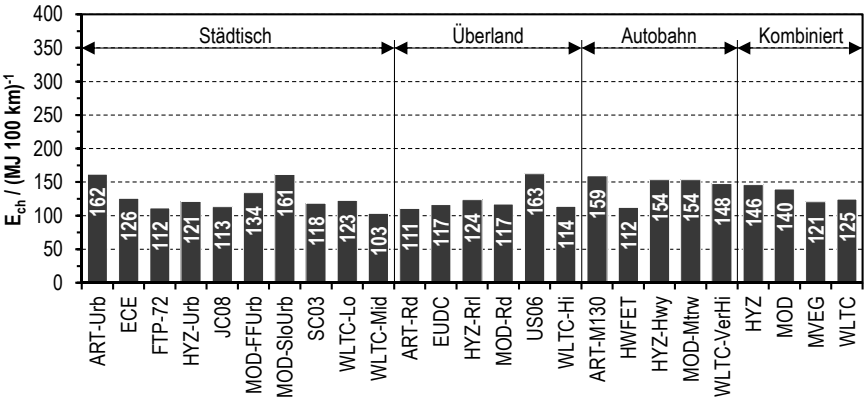


Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-D des C-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Keine Klimatisierung“ (KKL), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

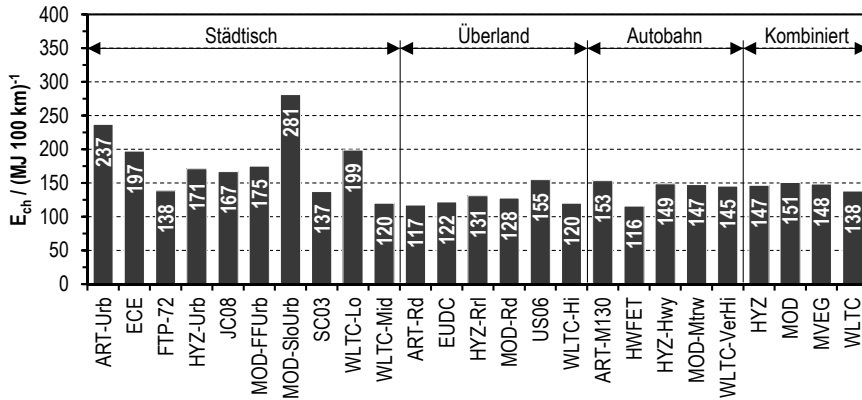


Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-D des A-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Frosttag“ (FRT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; **FreeUrb:** Free flow urban; **Highw:** Highway; **HYZ:** HYZEM; **MOD:** MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); **Rur:** Rural; **SlowUrb:** Slow urban; **Urb:** Urban

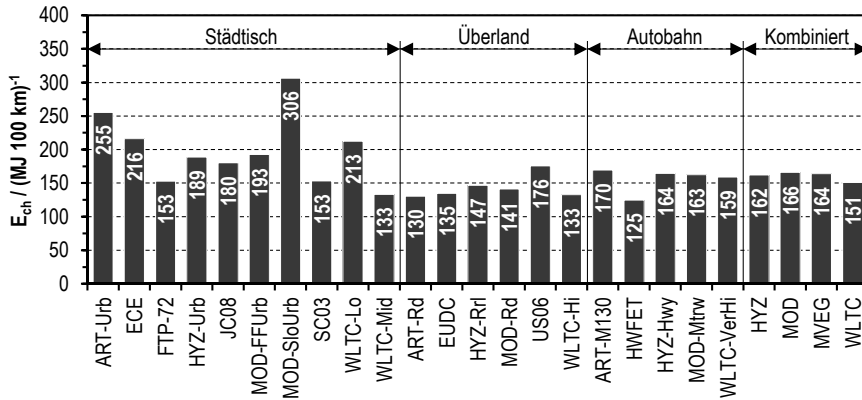


Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-D des C-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Frosttag“ (FRT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

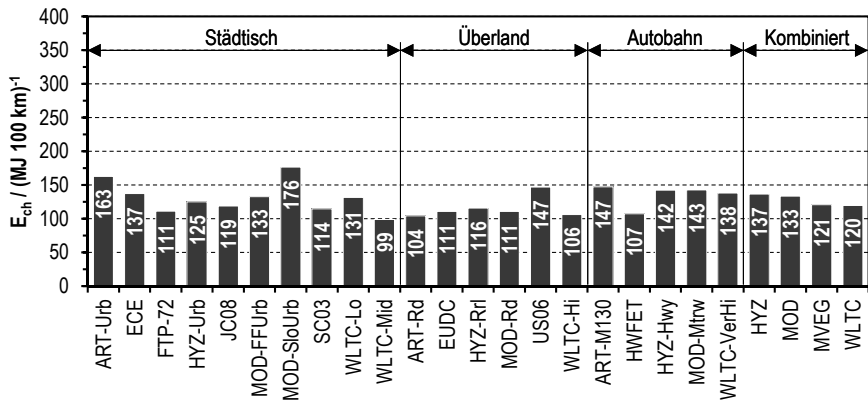
ART.: ARTEMIS; **FreeUrb:** Free flow urban; **Highw:** Highway; **HYZ:** HYZEM; **MOD:** MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); **Rur:** Rural; **SlowUrb:** Slow urban; **Urb:** Urban



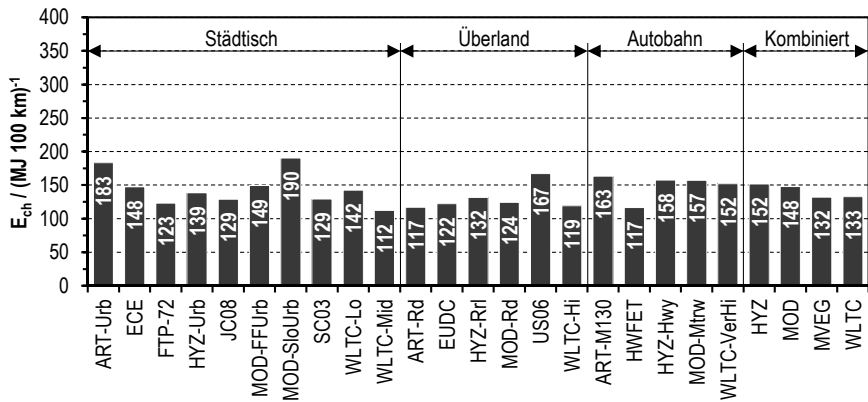
Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-D des A-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Sommertag“ (SOT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113
ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;
Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban



Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-D des C-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Sommertag“ (SOT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113
ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;
Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban



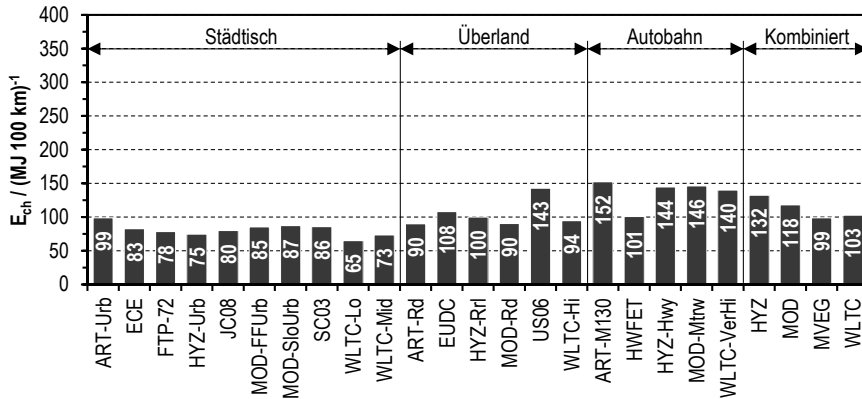
Szenario „Zukunft“, Kraftstoff Benzin

Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-G des A-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Nur Grundlast“ (GRL), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; **FreeUrb**: Free flow urban; **Highw**: Highway; **HYZ**: HYZEM; **MOD**: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); **Rur**: Rural; **SlowUrb**: Slow urban; **Urb**: Urban

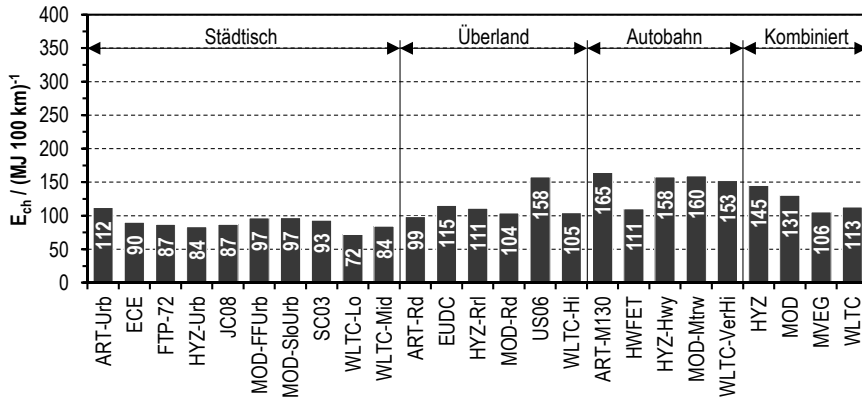


Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-G des C-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Nur Grundlast“ (GRL), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; **FreeUrb**: Free flow urban; **Highw**: Highway; **HYZ**: HYZEM; **MOD**: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); **Rur**: Rural; **SlowUrb**: Slow urban; **Urb**: Urban

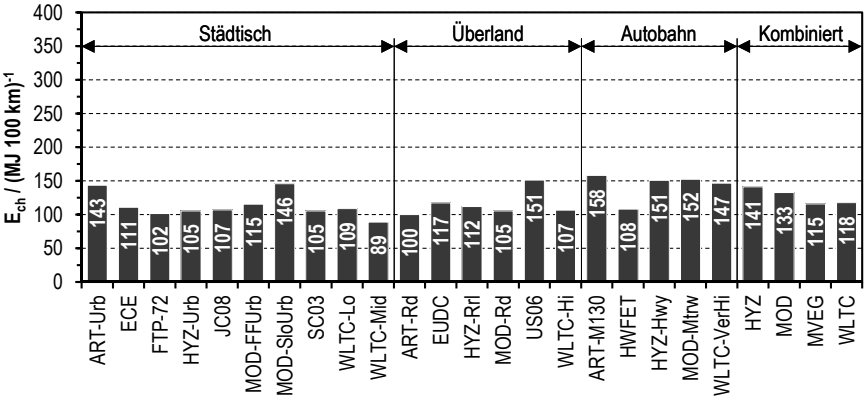


Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-G des A-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Keine Klimatisierung“ (KKL), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

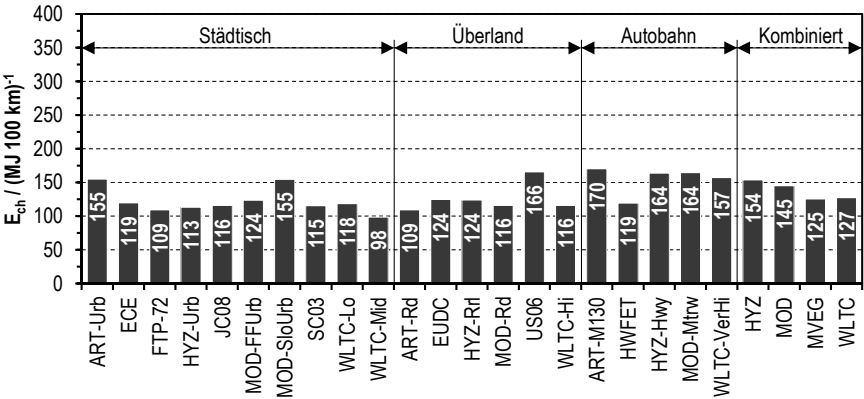


Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-G des C-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Keine Klimatisierung“ (KKL), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

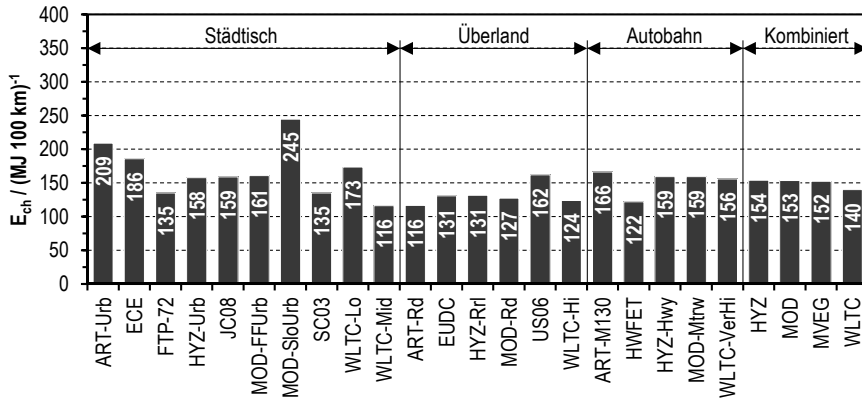


Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-G des A-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Frosttag“ (FRT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; **FreeUrb**: Free flow urban; **Highw**: Highway; **HYZ**: HYZEM; **MOD**: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); **Rur**: Rural; **SlowUrb**: Slow urban; **Urb**: Urban

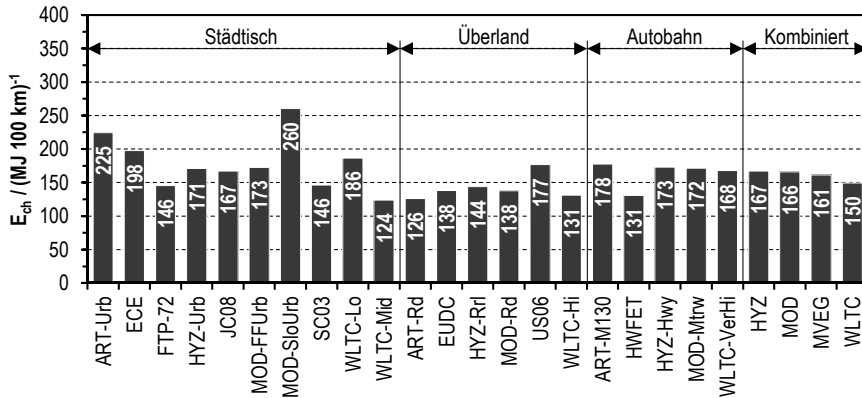


Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-G des C-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Frosttag“ (FRT), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; **FreeUrb**: Free flow urban; **Highw**: Highway; **HYZ**: HYZEM; **MOD**: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); **Rur**: Rural; **SlowUrb**: Slow urban; **Urb**: Urban

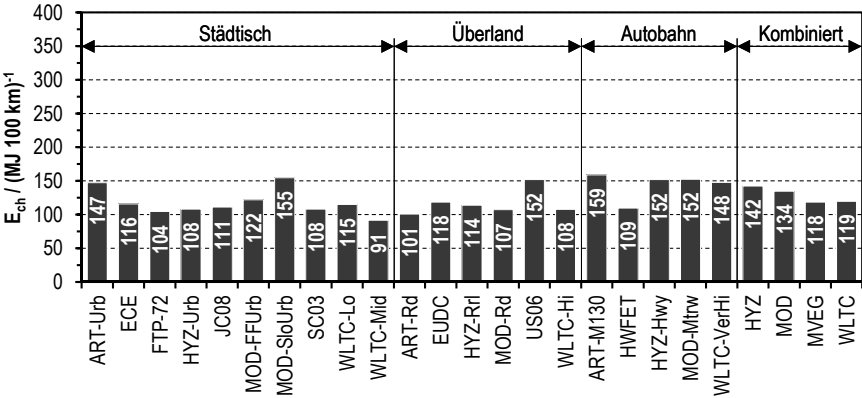


Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-G des A-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Sommertag“ (SOT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

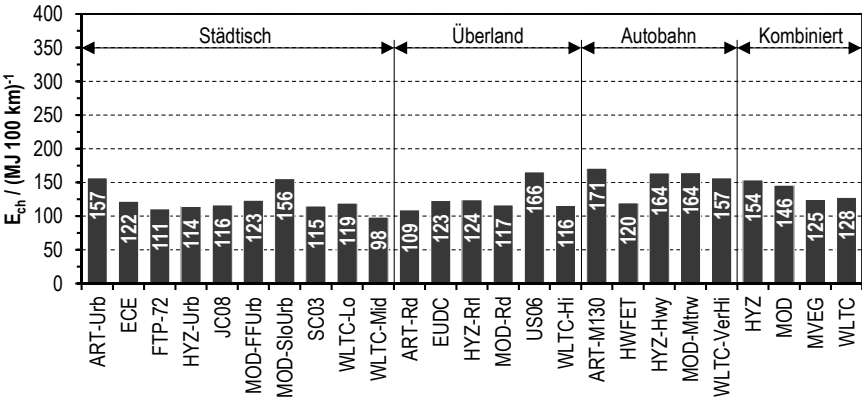


Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-G des C-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Sommertag“ (SOT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban



Szenario „Zukunft“, Kraftstoff Diesel

Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-D des A-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Nur Grundlast“ (GRL), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; **FreeUrb**: Free flow urban; **Highw**: Highway; **HYZ**: HYZEM; **MOD**: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); **Rur**: Rural; **SlowUrb**: Slow urban; **Urb**: Urban

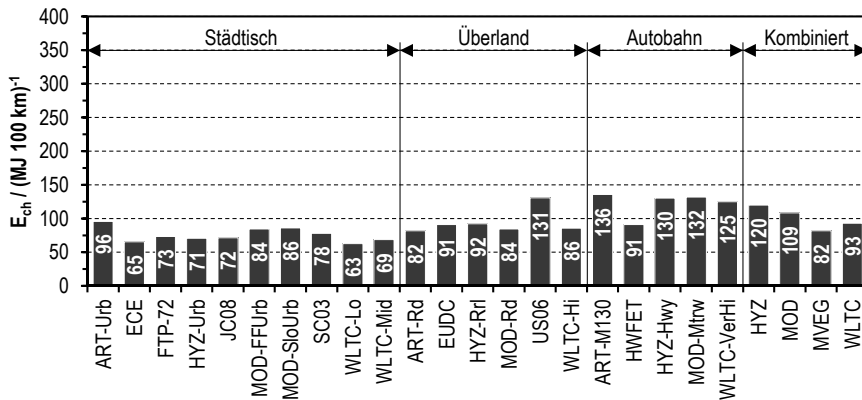


Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-D des C-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Nur Grundlast“ (GRL), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; **FreeUrb**: Free flow urban; **Highw**: Highway; **HYZ**: HYZEM; **MOD**: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); **Rur**: Rural; **SlowUrb**: Slow urban; **Urb**: Urban

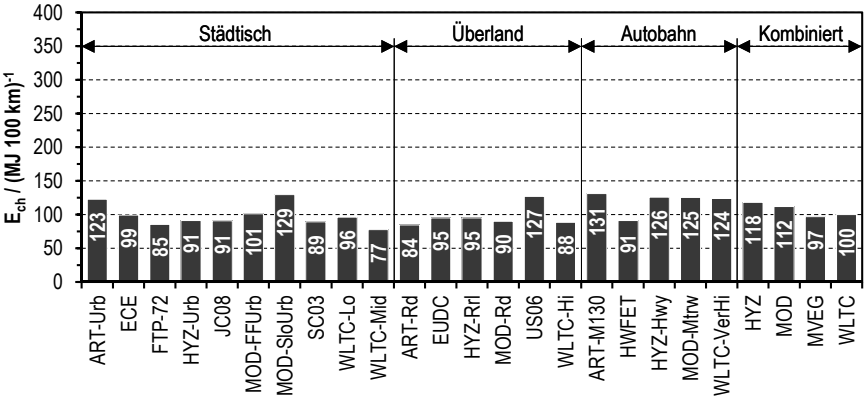


Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-D des A-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Keine Klimatisierung“ (KKL), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

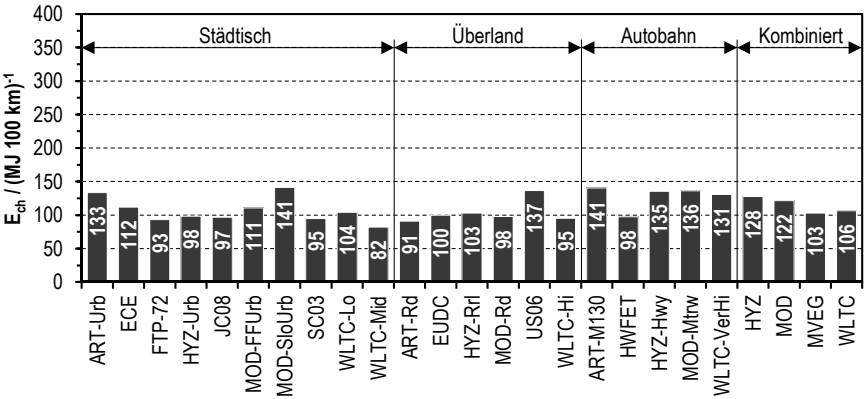


Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-D des C-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Keine Klimatisierung“ (KKL), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

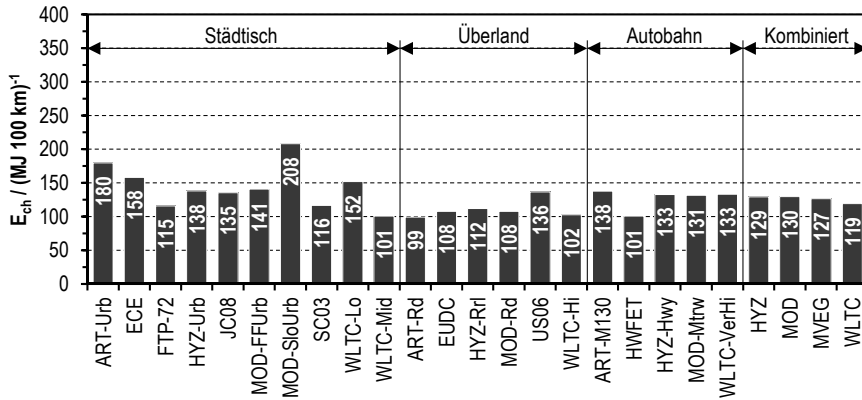


Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-D des A-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Frosttag“ (FRT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART: ARTEMIS; **FreeUrb:** Free flow urban; **Highw:** Highway; **HYZ:** HYZEM; **MOD:** MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); **Rur:** Rural; **SlowUrb:** Slow urban; **Urb:** Urban

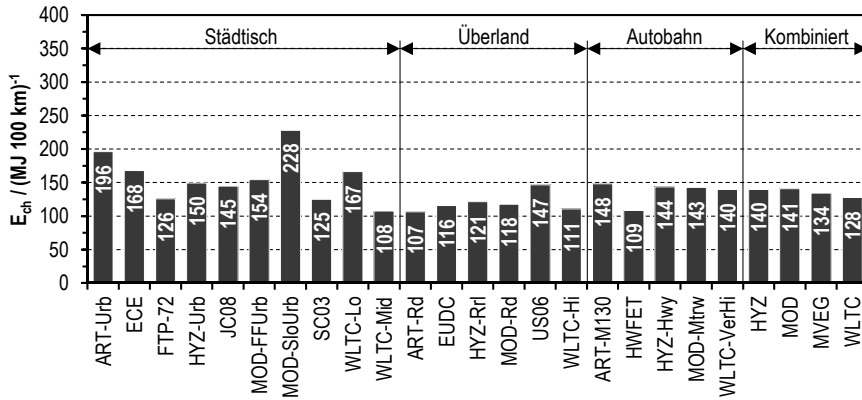


Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-D des C-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Frosttag“ (FRT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

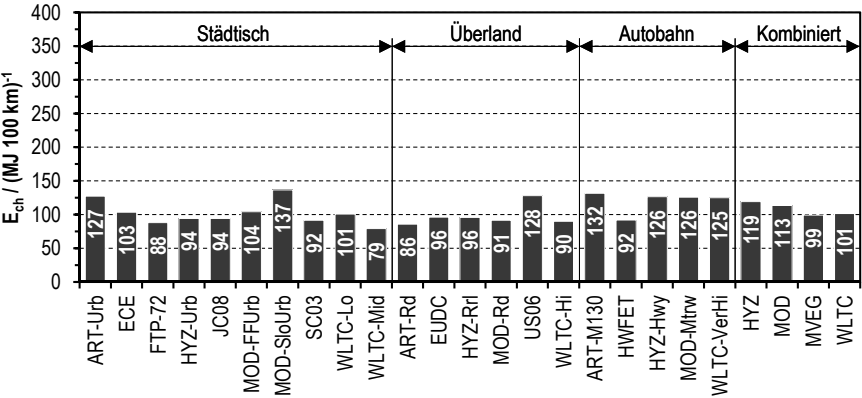
ART: ARTEMIS; **FreeUrb:** Free flow urban; **Highw:** Highway; **HYZ:** HYZEM; **MOD:** MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); **Rur:** Rural; **SlowUrb:** Slow urban; **Urb:** Urban



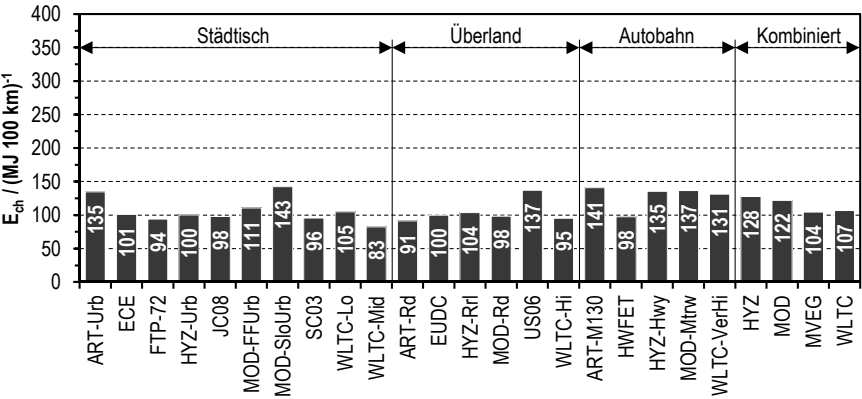
Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-D des A-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Sommertag“ (SOT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113
ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;
Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban



Kraftstoffverbrauchswerte von PAH-D des C-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Sommertag“ (SOT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113
ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;
Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban



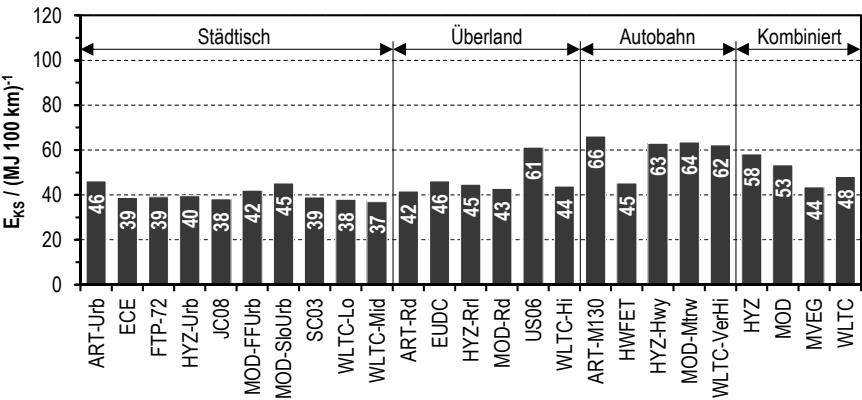
Teil 3: Batterie-Pkw (BEV)
Szenario „Standard“

Kraftstoffverbrauchswerte von BEV des A-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Nur Grundlast“ (GRL), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

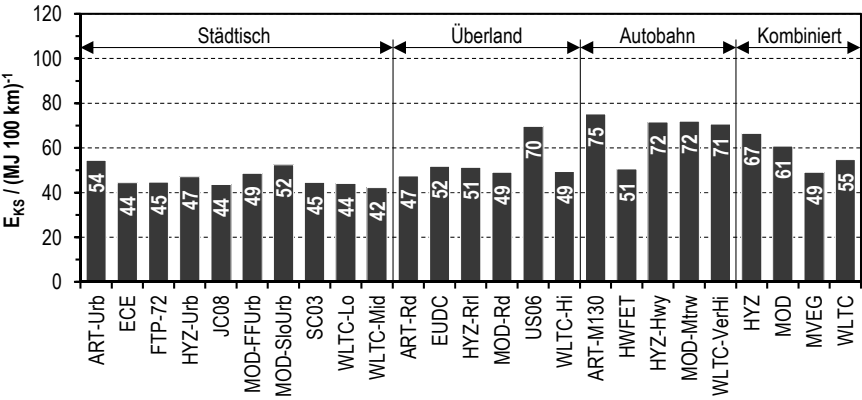


Kraftstoffverbrauchswerte von BEV des C-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Nur Grundlast“ (GRL), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

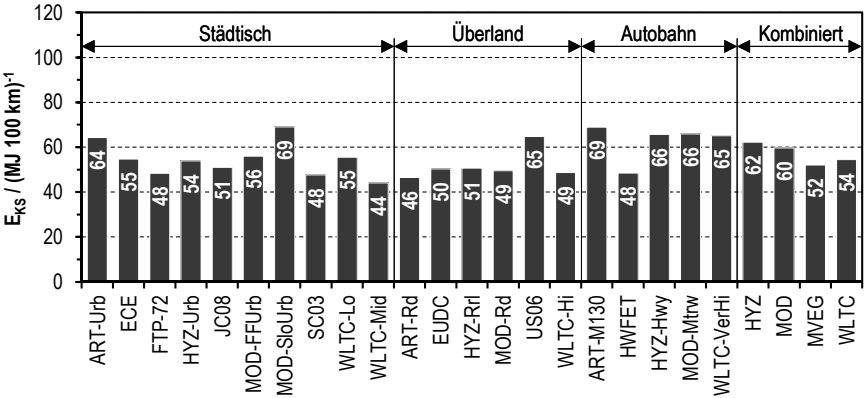


Kraftstoffverbrauchswerte von BEV des A-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Keine Klimatisierung“ (KKL), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

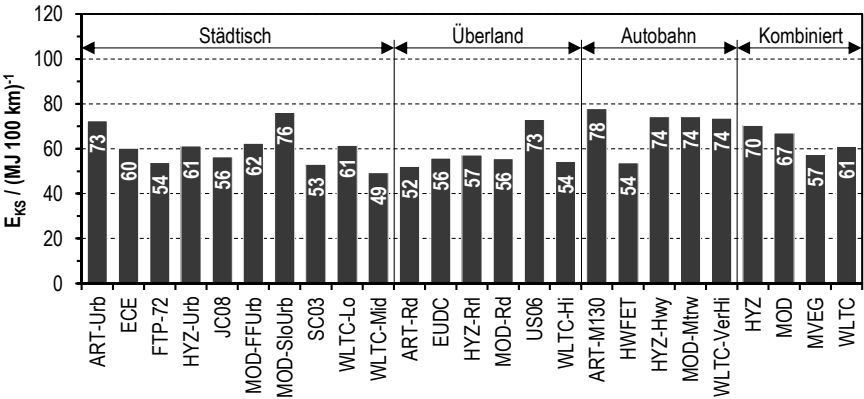


Kraftstoffverbrauchswerte von BEV des C-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Keine Klimatisierung“ (KKL), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

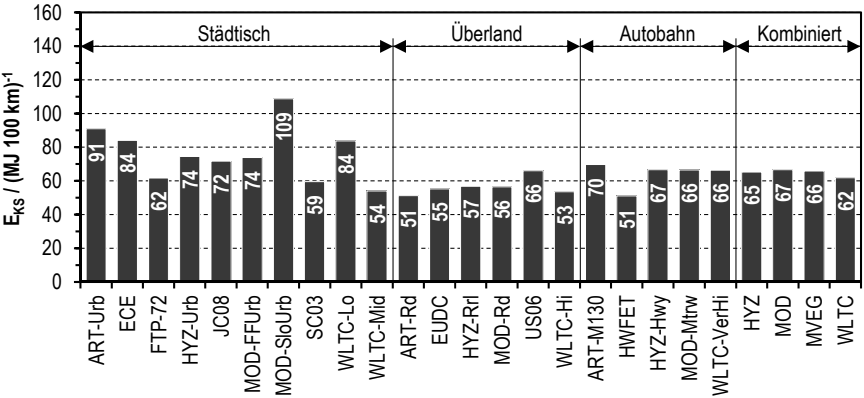


Kraftstoffverbrauchswerte von BEV des A-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Frosttag“ (FRT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

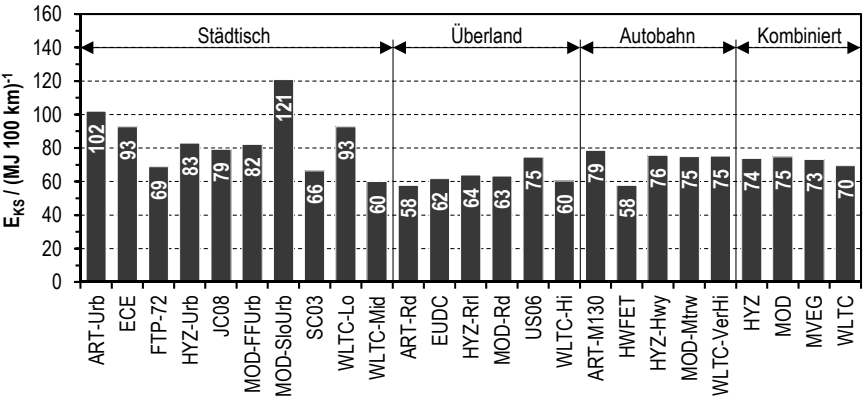


Kraftstoffverbrauchswerte von BEV des C-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Frosttag“ (FRT), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

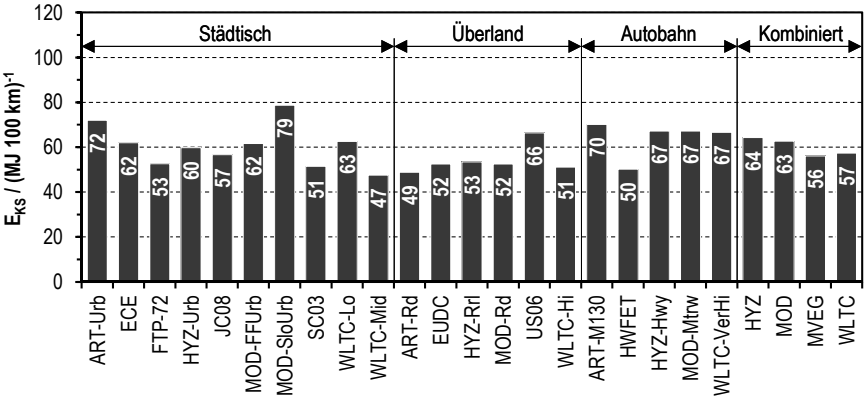


Kraftstoffverbrauchswerte von BEV des A-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Sommertag“ (SOT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

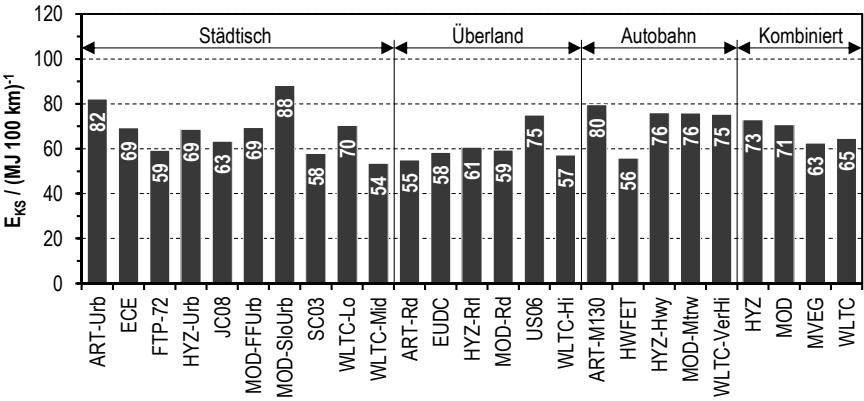


Kraftstoffverbrauchswerte von BEV des C-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Sommertag“ (SOT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban



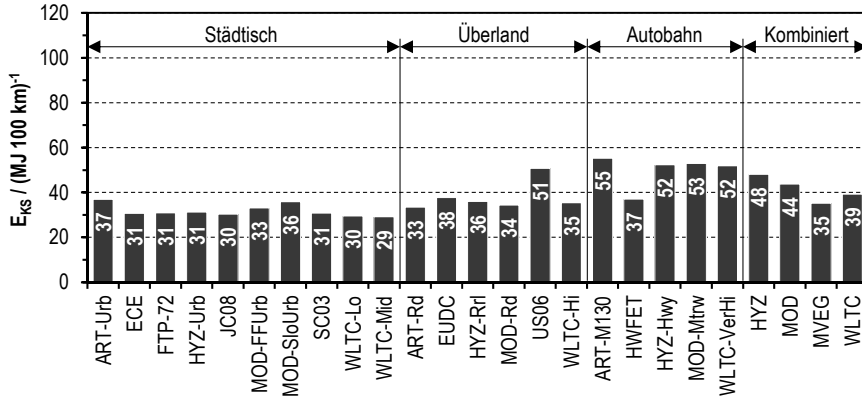
Szenario „Zukunft“

Kraftstoffverbrauchswerte von BEV des A-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Nur Grundlast“ (GRL), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; **FreeUrb**: Free flow urban; **Highw**: Highway; **HYZ**: HYZEM; **MOD**: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); **Rur**: Rural; **SlowUrb**: Slow urban; **Urb**: Urban

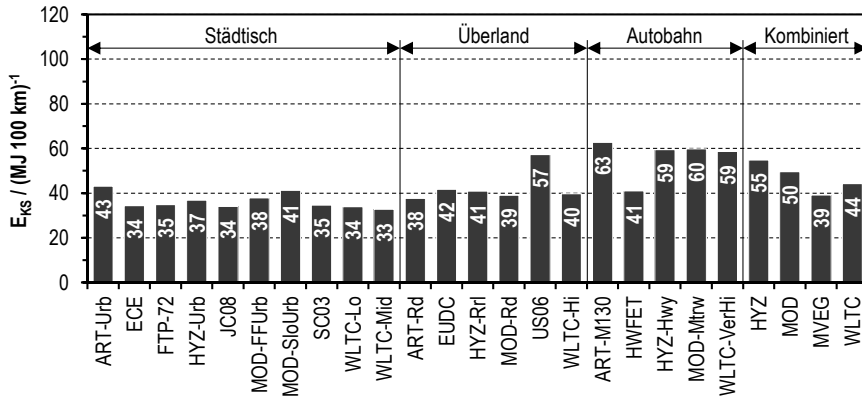


Kraftstoffverbrauchswerte von BEV des C-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Nur Grundlast“ (GRL), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; **FreeUrb**: Free flow urban; **Highw**: Highway; **HYZ**: HYZEM; **MOD**: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); **Rur**: Rural; **SlowUrb**: Slow urban; **Urb**: Urban

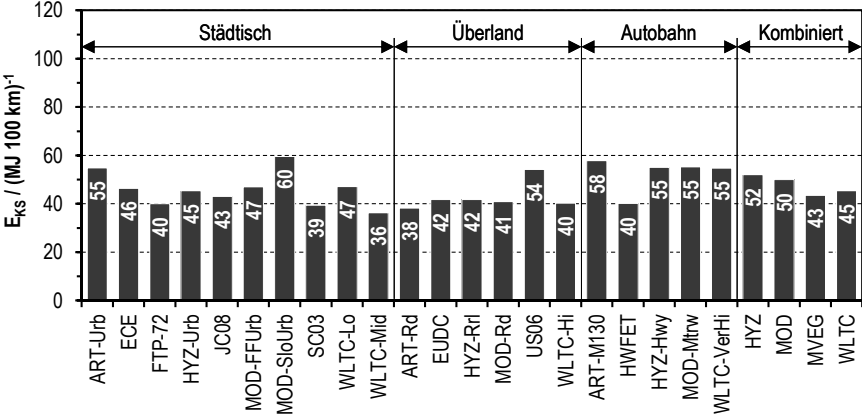


Kraftstoffverbrauchswerte von BEV des A-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Keine Klimatisierung“ (KKL), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

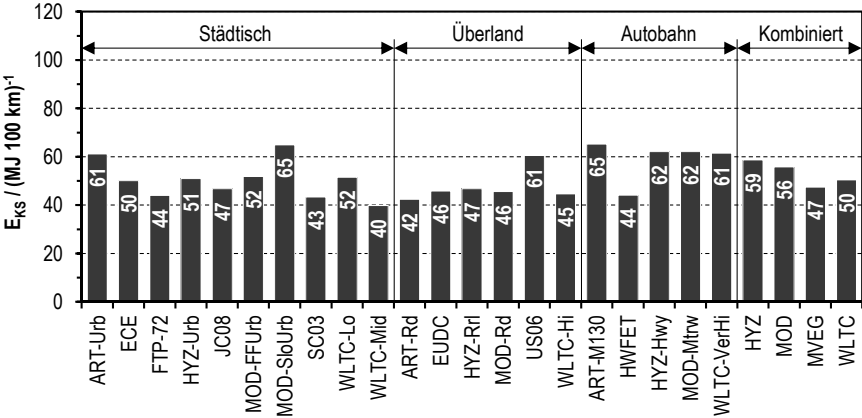


Kraftstoffverbrauchswerte von BEV des C-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Keine Klimatisierung“ (KKL), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

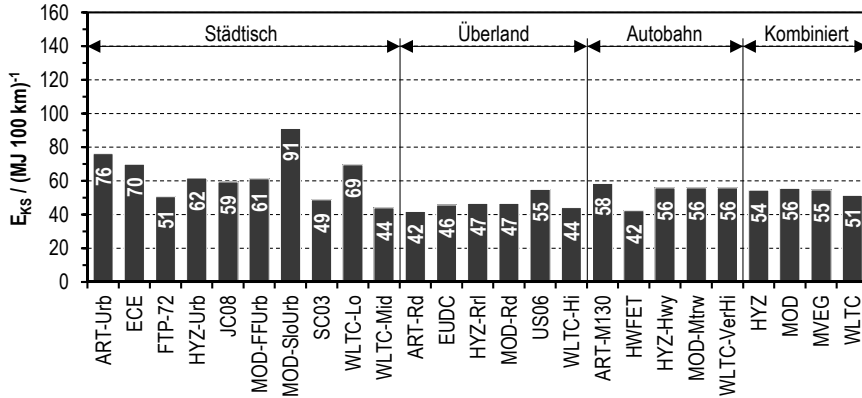


Kraftstoffverbrauchswerte von BEV des A-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Frosttag“ (FRT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; **FreeUrb**: Free flow urban; **Highw**: Highway; **HYZ**: HYZEM; **MOD**: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h^{-1}); **Rur**: Rural; **SlowUrb**: Slow urban; **Urb**: Urban

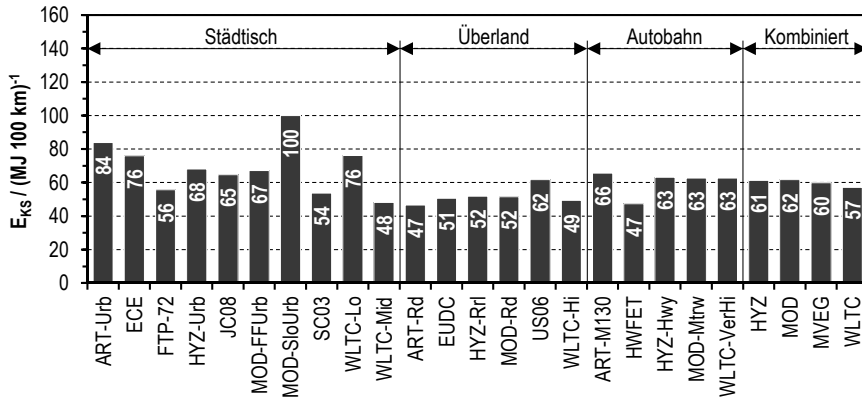


Kraftstoffverbrauchswerte von BEV des C-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Frosttag“ (FRT), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; **FreeUrb**: Free flow urban; **Highw**: Highway; **HYZ**: HYZEM; **MOD**: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h^{-1}); **Rur**: Rural; **SlowUrb**: Slow urban; **Urb**: Urban

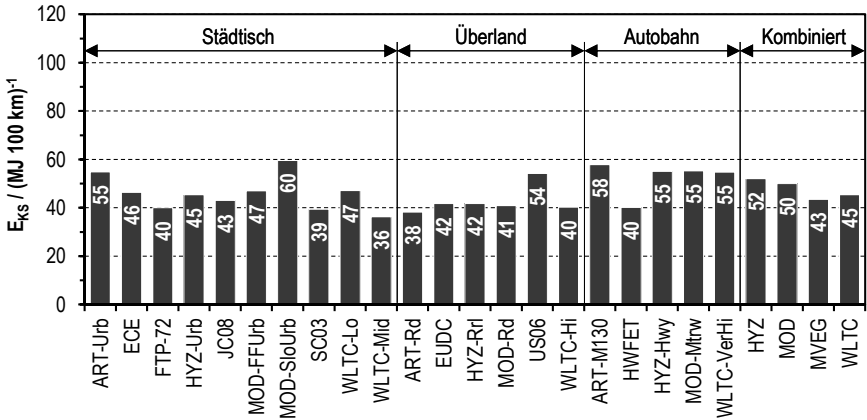


Kraftstoffverbrauchswerte von BEV des A-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Sommertag“ (SOT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

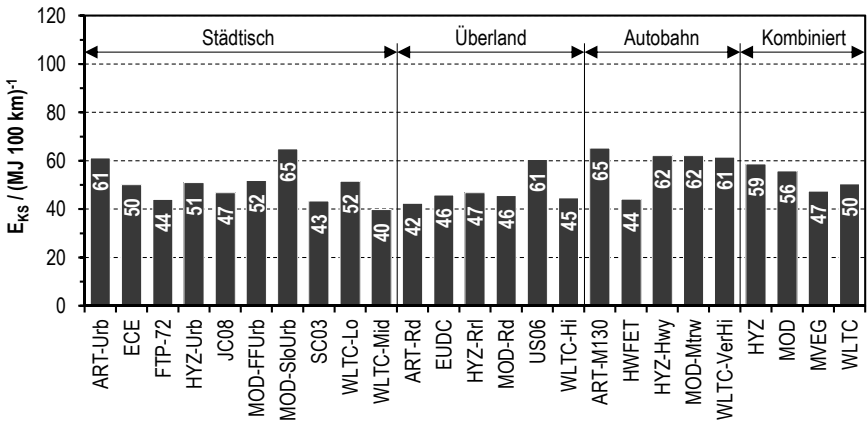


Kraftstoffverbrauchswerte von BEV des C-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Sommertag“ (SOT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

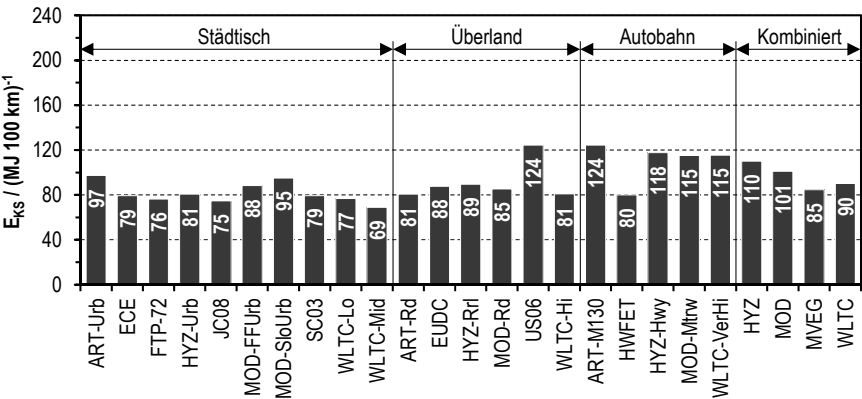
Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban



Teil 4: Brennstoffzellen-Pkw (FCV)
Szenario „Standard“

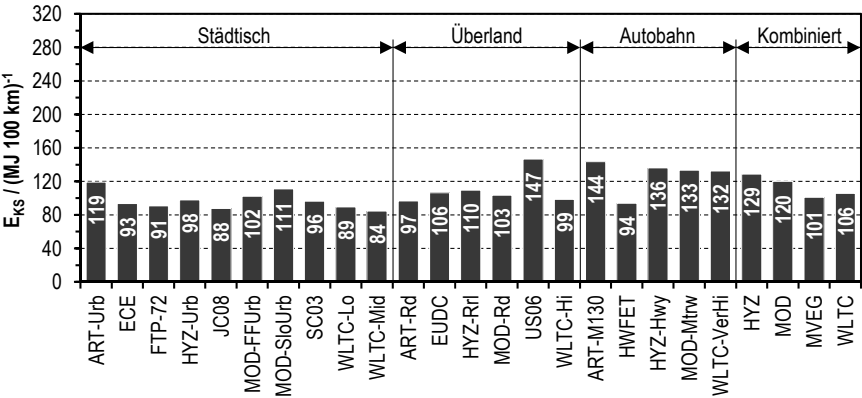
Kraftstoffverbrauchswerte von FCV des A-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Nur Grundlast“ (GRL), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113
ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;
Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban



Kraftstoffverbrauchswerte von FCV des C-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Nur Grundlast“ (GRL), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113
ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;
Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

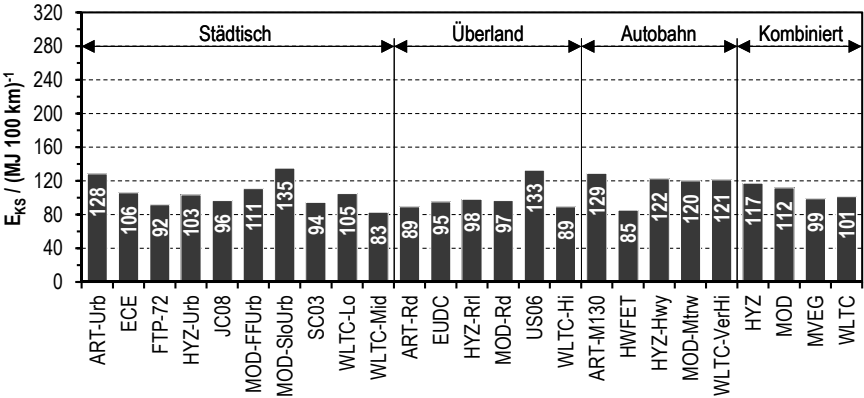


Kraftstoffverbrauchswerte von FCV des A-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Keine Klimatisierung“ (KKL), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

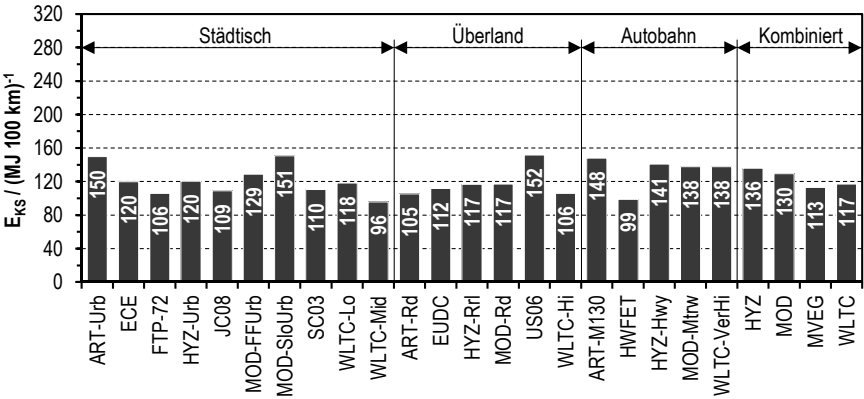


Kraftstoffverbrauchswerte von FCV des C-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Keine Klimatisierung“ (KKL), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

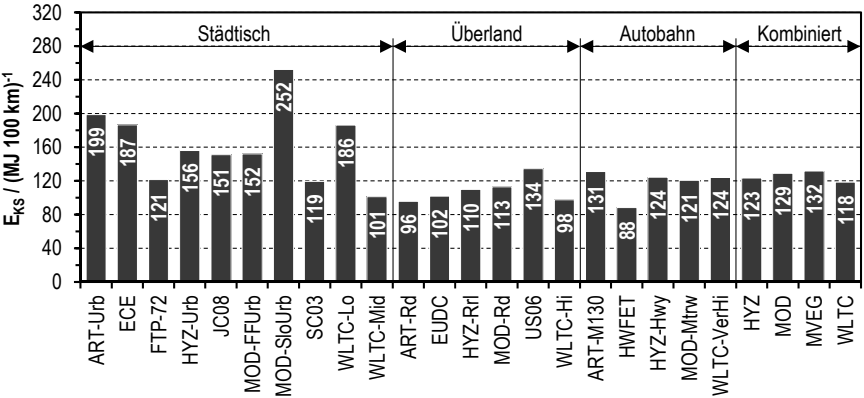


Kraftstoffverbrauchswerte von FCV des A-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Frosttag“ (FRT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

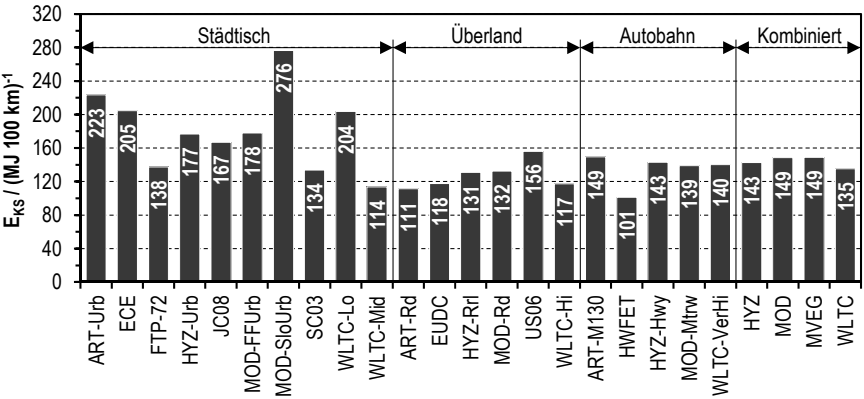


Kraftstoffverbrauchswerte von FCV des C-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Frosttag“ (FRT), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

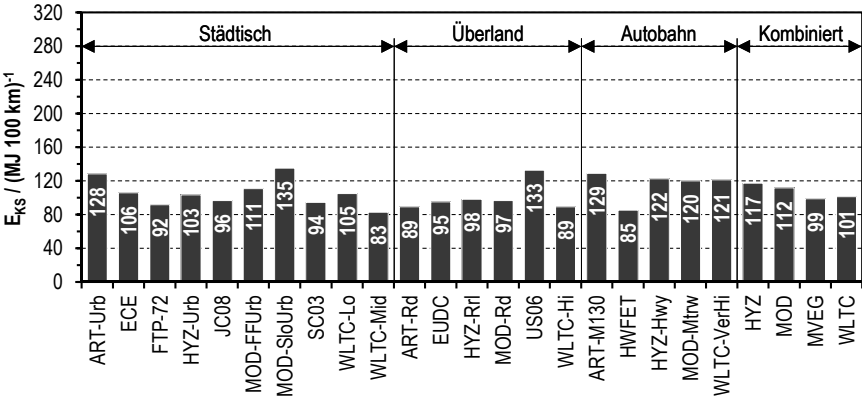


Kraftstoffverbrauchswerte von FCV des A-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Sommertag“ (SOT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

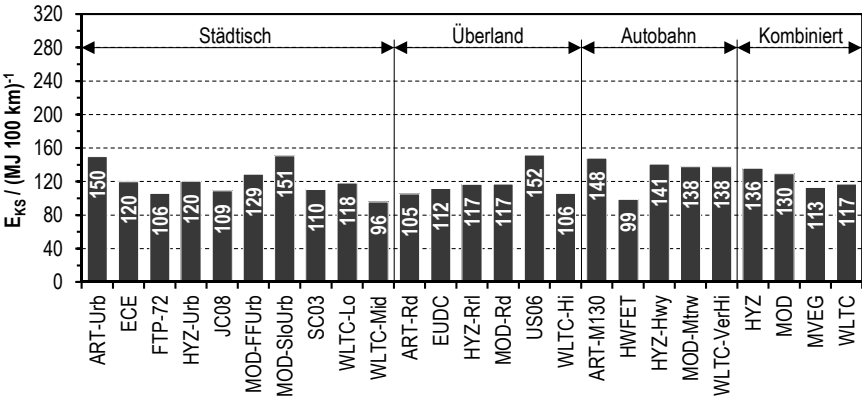


Kraftstoffverbrauchswerte von FCV des C-Segments im Szenario „Standard“.

Lastfall: „Sommertag“ (SOT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

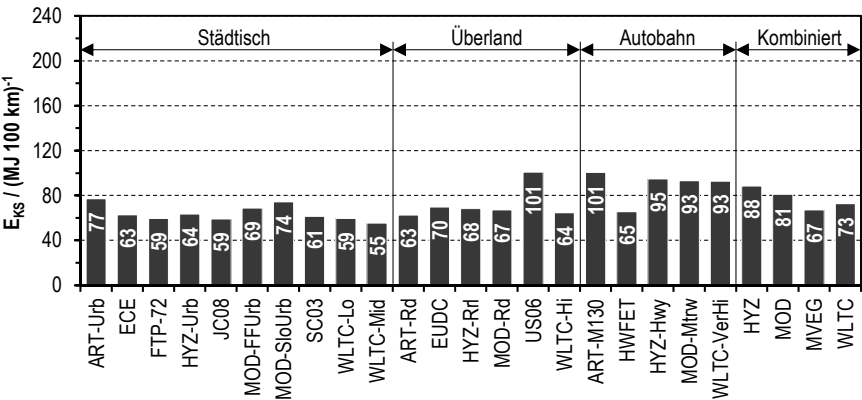
Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban



Szenario „Zukunft“

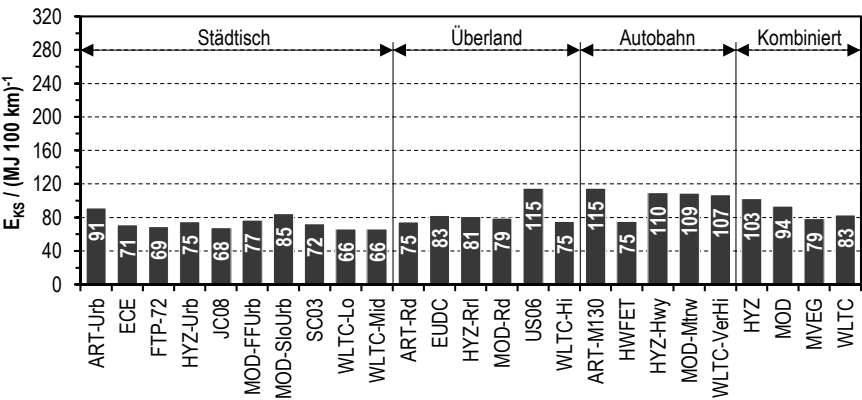
Kraftstoffverbrauchswerte von FCV des A-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Nur Grundlast“ (GRL), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113
ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;
Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban



Kraftstoffverbrauchswerte von FCV des C-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Nur Grundlast“ (GRL), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113
ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;
Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

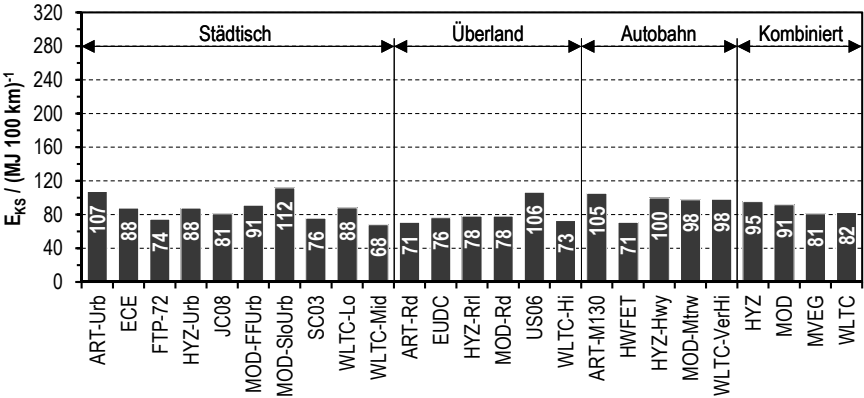


Kraftstoffverbrauchswerte von FCV des A-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Keine Klimatisierung“ (KKL), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

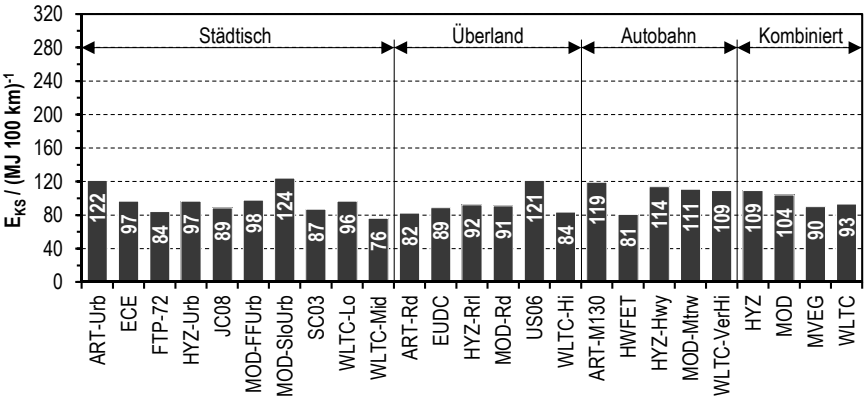


Kraftstoffverbrauchswerte von FCV des C-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Keine Klimatisierung“ (KKL), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

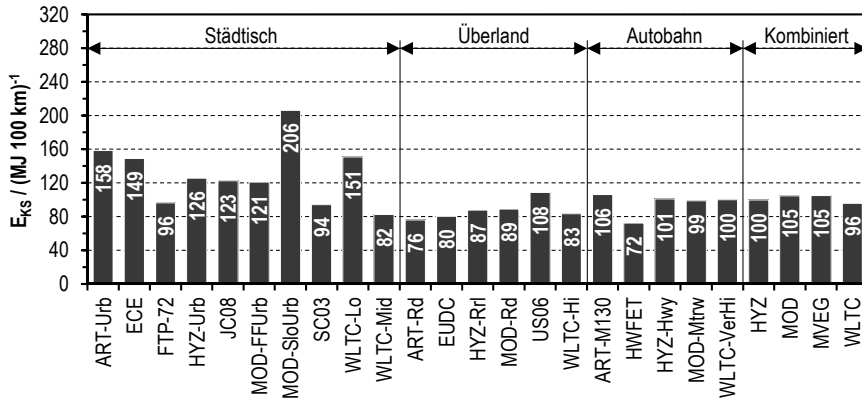


Kraftstoffverbrauchswerte von FCV des A-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Frosttag“ (FRT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; **FreeUrb**: Free flow urban; **Highw**: Highway; **HYZ**: HYZEM; **MOD**: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h^{-1}); **Rur**: Rural; **SlowUrb**: Slow urban; **Urb**: Urban

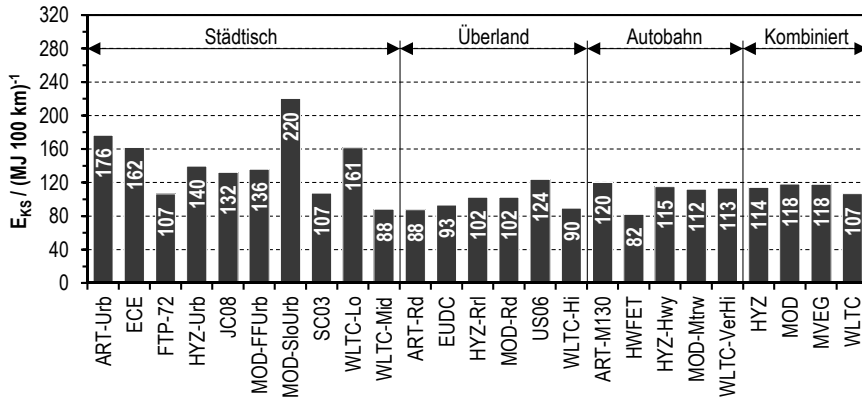


Kraftstoffverbrauchswerte von FCV des C-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Frosttag“ (FRT), Definitionen siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; **FreeUrb**: Free flow urban; **Highw**: Highway; **HYZ**: HYZEM; **MOD**: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h^{-1}); **Rur**: Rural; **SlowUrb**: Slow urban; **Urb**: Urban

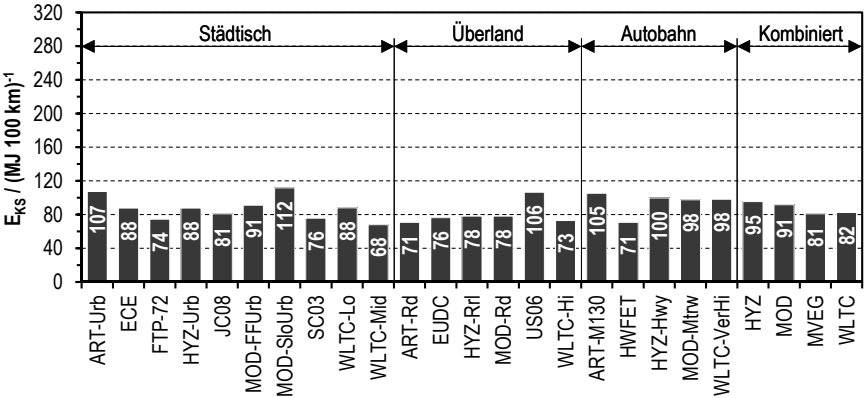


Kraftstoffverbrauchswerte von FCV des A-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Sommertag“ (SOT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban

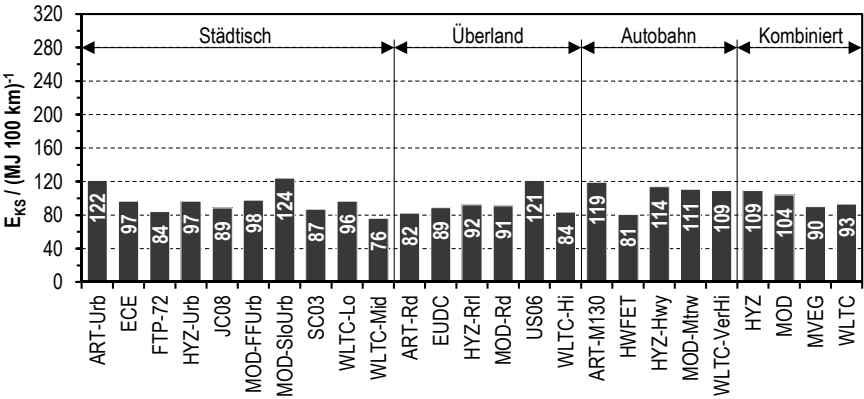


Kraftstoffverbrauchswerte von FCV des C-Segments im Szenario „Zukunft“.

Lastfall: „Sommertag“ (SOT), Definitionen, siehe Tab. 6-1, S. 113

ART.: ARTEMIS; FreeUrb: Free flow urban; Highw: Highway; HYZ: HYZEM; MOD: MODEM;

Mtrway130: Motorway (maximal 130 km h⁻¹); Rur: Rural; SlowUrb: Slow urban; Urb: Urban



ANHANG L:

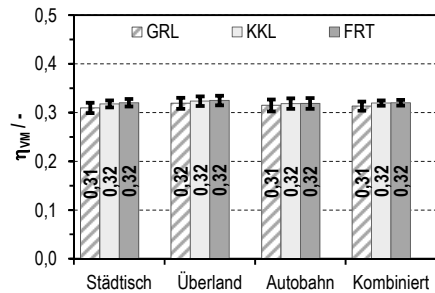
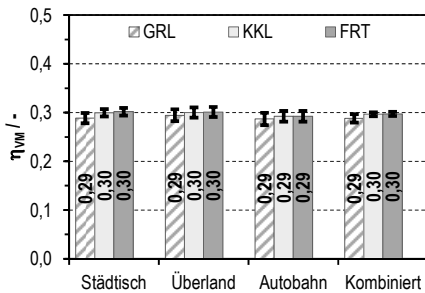
WIRKUNGSRADE UND ENERGETISCHE NUTZUNGSRADE

Teil 1: Verbrennungsmotor-Pkw (ICV) – Szenario „Standard“, Kraftstoff: Benzin

Mittlere Verbrennungsmotorwirkungsgrade von ICV-G im Szenario „Standard“.

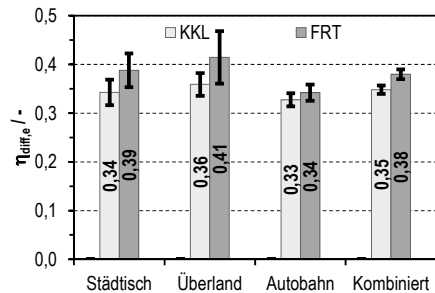
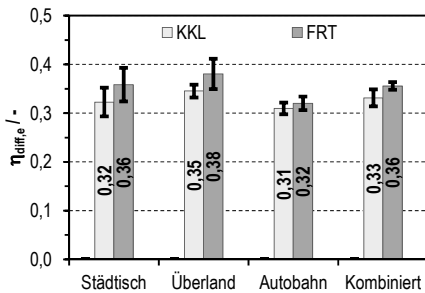
Links: A-Segment; rechts: C-Segment.

Werte für Bordnetzlast- und Klimatisierungsfälle laut Tab. 6-1. Fehlerindikatoren geben die Standardabweichungen innerhalb der Fahrzyklengruppen an; **ICV**: Verbrennungsmotor-Pkw; **FRT**: „Frosttag“; **GRL**: „Nur Grundlast“; **KKL**: „Keine Klimatisierung“; **SOT**: Sommertag (für ICV in dieser Analyse nicht darstellbar).



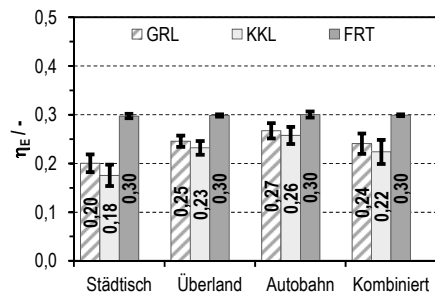
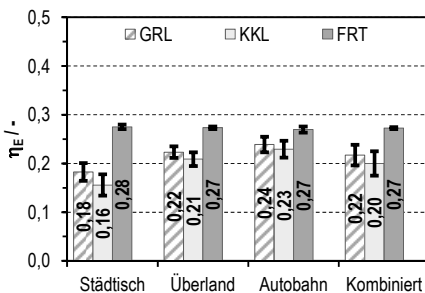
Mittlere differentielle Wirkungsgrade der Stromerzeugung bei ICV-G im Szenario „Standard“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Anmerkungen zur Darstellung siehe Bildüberschrift weiter oben.



Mittlere energetische Nutzungsgrade von ICV-G im Szenario „Standard“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Anmerkungen zur Darstellung siehe Bildüberschrift weiter oben.

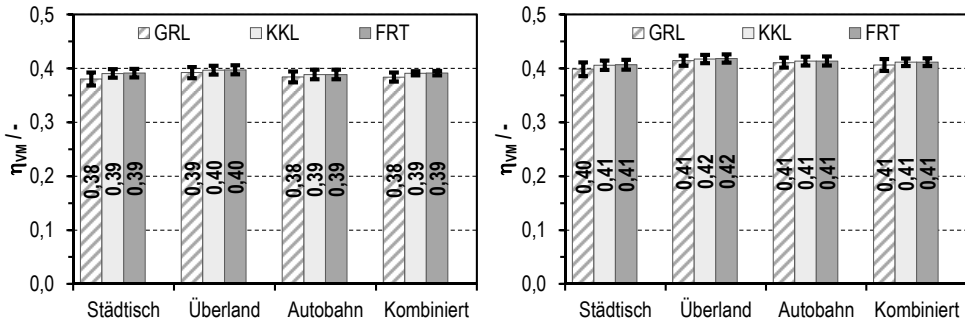


Szenario „Standard“, Kraftstoff: Diesel

Mittlere Verbrennungsmotorwirkungsgrade von ICV-D im Szenario „Standard“.

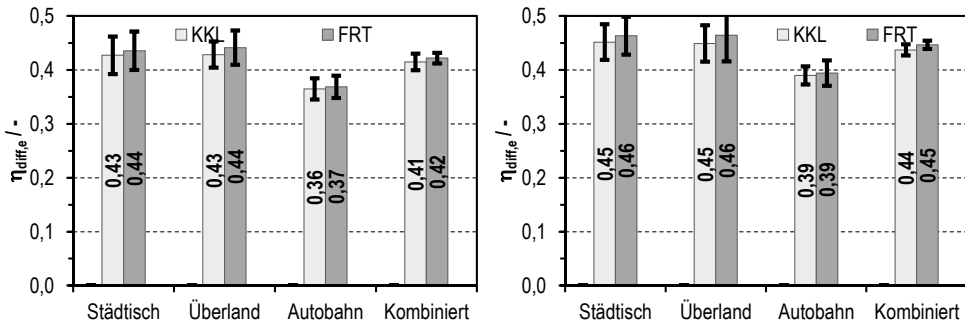
Links: A-Segment; rechts: C-Segment.

Werte für Bordnetzlast- und Klimatisierungsfälle laut Tab. 6-1. Fehlerindikatoren geben die Standardabweichungen innerhalb der Fahrzyklengruppen an; ICV: Verbrennungsmotor-Pkw; FRT: „Frosttag“; GRL: „Nur Grundlast“; KKL: „Keine Klimatisierung“; SOT: „Sommertag“ (für ICV in dieser Analyse nicht darstellbar).



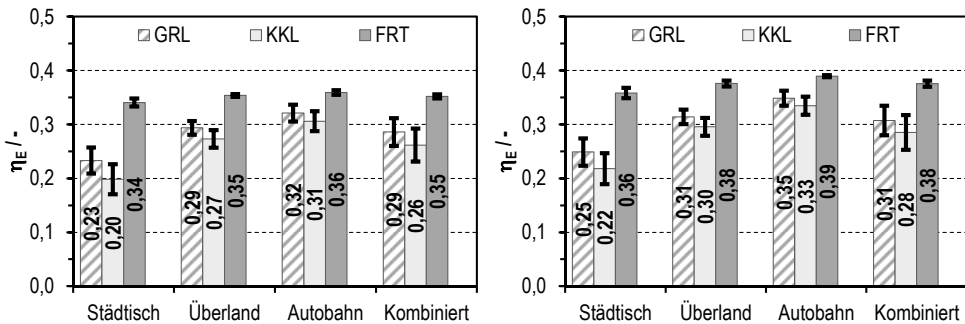
Mittlere differentielle Wirkungsgrade der Stromerzeugung bei ICV-D im Szenario „Standard“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Anmerkungen zur Darstellung siehe Bildüberschrift weiter oben.



Mittlere energetische Nutzungsgrade von ICV-D im Szenario „Standard“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Anmerkungen zur Darstellung siehe Bildüberschrift weiter oben.

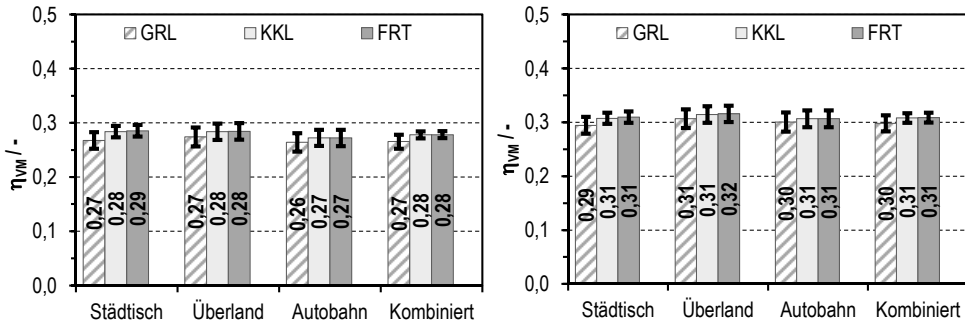


Szenario „Zukunft“, Kraftstoff: Benzin

Mittlere Verbrennungsmotorwirkungsgrade von ICV-G im Szenario „Zukunft“.

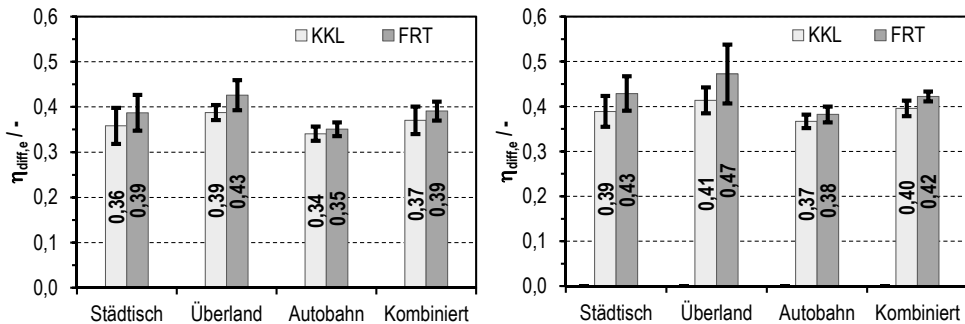
Links: A-Segment; rechts: C-Segment.

Werte für Bordnetzlast- und Klimatisierungsfälle laut Tab. 6-1. Fehlerindikatoren geben die Standardabweichungen innerhalb der Fahrzyklengruppen an; ICV: Verbrennungsmotor-Pkw; FRT: „Frosttag“; GRL: „Nur Grundlast“; KKL: „Keine Klimatisierung“; SOT: „Sommertag“ (für ICV in dieser Analyse nicht darstellbar).



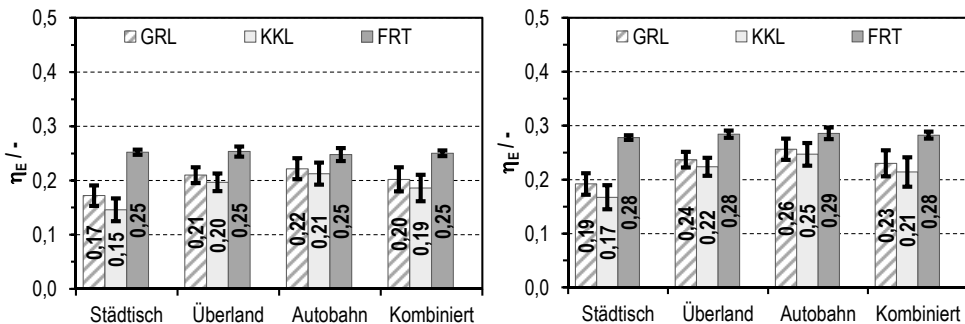
Mittlere differentielle Wirkungsgrade der Stromerzeugung bei ICV-G im Szenario „Zukunft“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Anmerkungen zur Darstellung siehe Bildüberschrift weiter oben.



Mittlere energetische Nutzungsgrade von ICV-G im Szenario „Zukunft“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Anmerkungen zur Darstellung siehe Bildüberschrift weiter oben.

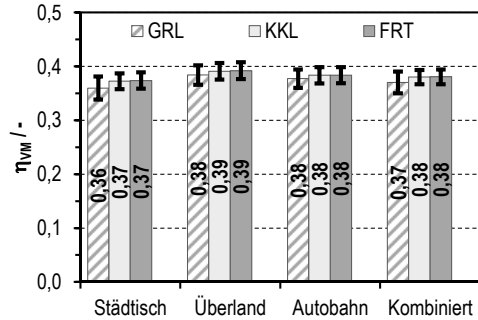
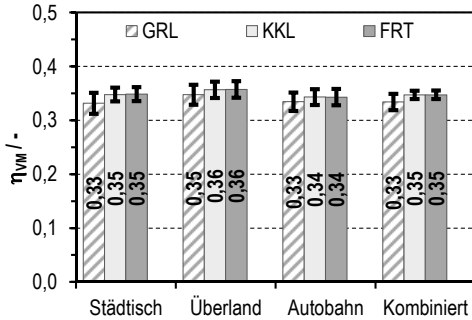


Szenario „Zukunft“, Kraftstoff: Diesel

Mittlere Verbrennungsmotorwirkungsgrade von ICV-D im Szenario „Zukunft“.

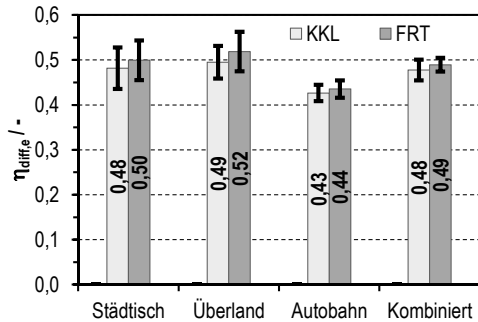
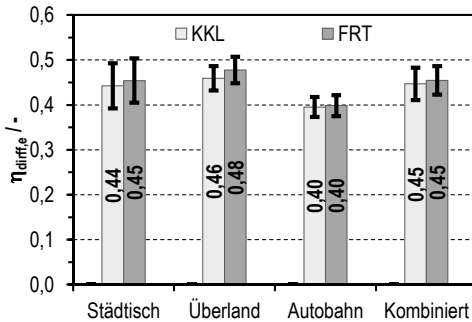
Links: A-Segment; rechts: C-Segment.

Werte für Bordnetzlast- und Klimatisierungsfälle laut Tab. 6-1. Fehlerindikatoren geben die Standardabweichungen innerhalb der Fahrzyklengruppen an; **ICV**: Verbrennungsmotor-Pkw; **FRT**: „Frosttag“; **GRL**: „Nur Grundlast“; **KKL**: „Keine Klimatisierung“; **SOT**: „Sommertag“ (für ICV in dieser Analyse nicht darstellbar).



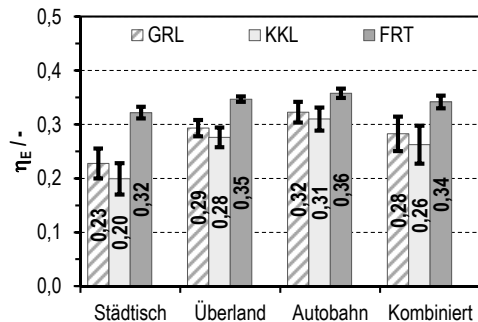
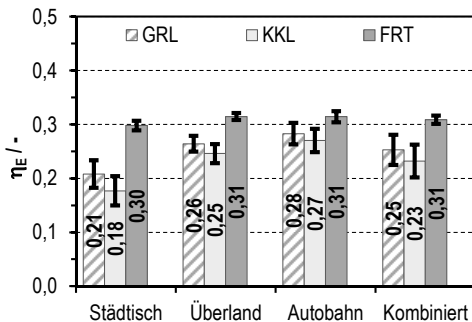
Mittlere differentielle Wirkungsgrade der Stromerzeugung bei ICV-D im Szenario „Zukunft“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Anmerkungen zur Darstellung siehe Bildüberschrift weiter oben.



Mittlere energetische Nutzungsgrade von ICV-D im Szenario „Zukunft“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Anmerkungen zur Darstellung siehe Bildüberschrift weiter oben.



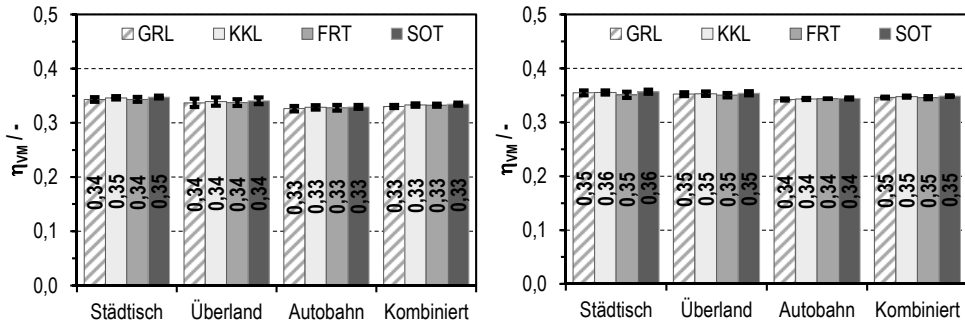
Teil 2: Parallelhybrid-Pkw (PAH) – Szenario „Standard“, Kraftstoff: Benzin

Mittlere Verbrennungsmotorwirkungsgrade von PAH-G im Szenario „Standard“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment.

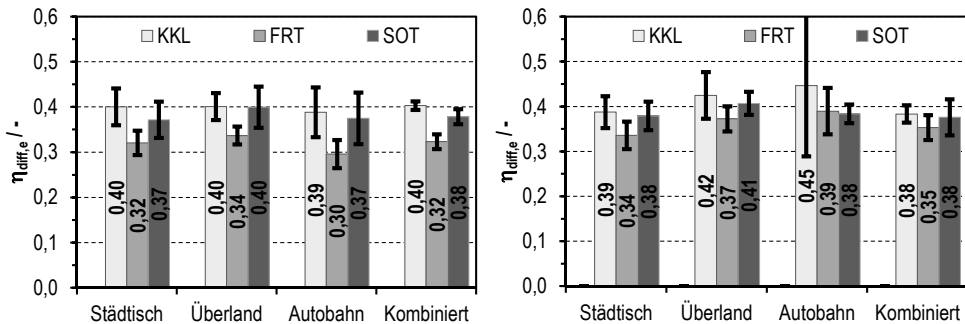
Werte für Bordnetzlast- und Klimatisierungsfälle laut Tab. 6-1. Fehlerindikatoren geben die Standardabweichungen innerhalb der Fahrzyklengruppen an; **PAH-G**: Parallelhybrid-Pkw mit Ottomotor;

FRT: „Frosttag“; **GRL**: „Nur Grundlast“; **KKL**: „Keine Klimatisierung“; **SOT**: „Sommertag“.



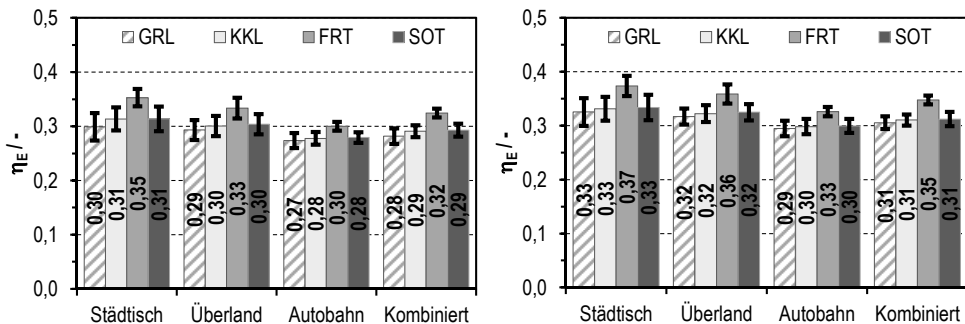
Mittlere differentielle Wirkungsgrade der Stromerzeugung bei PAH-G im Szenario „Standard“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Anmerkungen zur Darstellung siehe Bildüberschrift weiter oben.



Mittlere energetische Nutzungsgrade von PAH-G im Szenario „Standard“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Anmerkungen zur Darstellung siehe Bildüberschrift weiter oben.



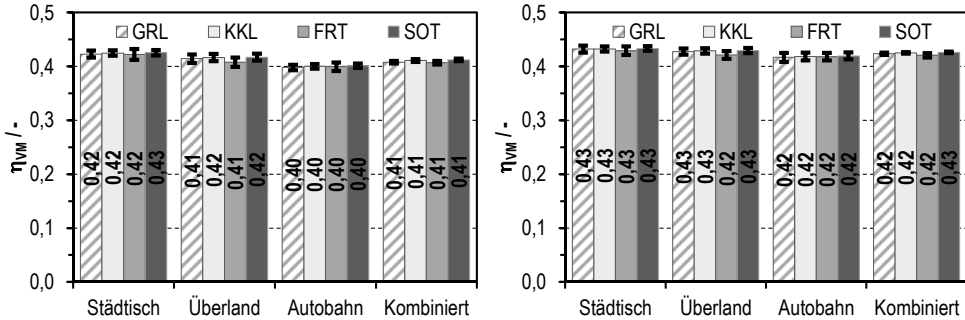
Szenario „Standard“, Kraftstoff: Diesel

Mittlere Verbrennungsmotorwirkungsgrade von PAH-D im Szenario „Standard“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment.

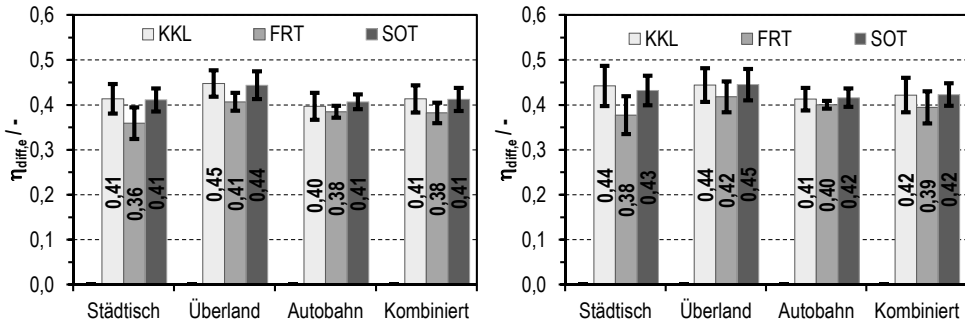
Werte für Bordnetzlast- und Klimatisierungsfälle laut Tab. 6-1. Fehlerindikatoren geben die Standardabweichungen innerhalb der Fahrzyklengruppen an; **PAH-D**: Parallelhybrid-Pkw mit Dieselmotor;

FRT: „Frosttag“; **GRL**: „Nur Grundlast“; **KKL**: „Keine Klimatisierung“; **SOT**: „Sommertag“.



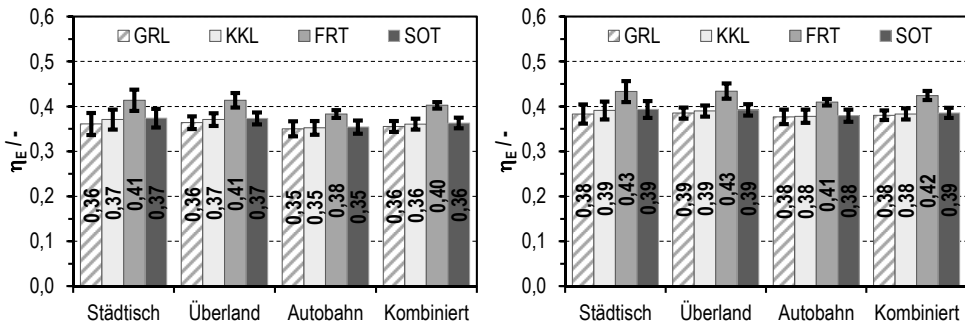
Mittlere differentielle Wirkungsgrade der Stromerzeugung bei PAH-D im Szenario „Standard“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Anmerkungen zur Darstellung siehe Bildüberschrift weiter oben.



Mittlere energetische Nutzungsgrade von PAH-D im Szenario „Standard“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Anmerkungen zur Darstellung siehe Bildüberschrift weiter oben.



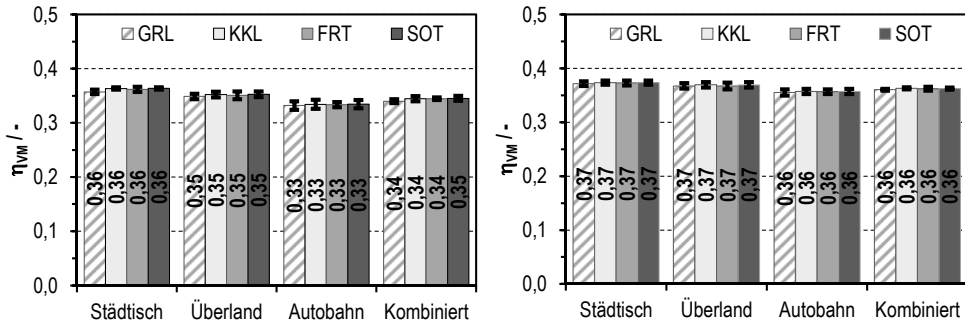
Szenario „Zukunft“, Kraftstoff: Benzin

Mittlere Verbrennungsmotorwirkungsgrade von PAH-G im Szenario „Zukunft“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment.

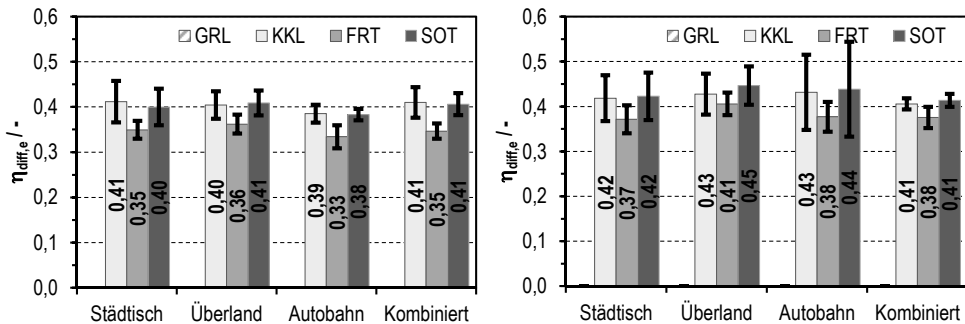
Werte für Bordnetzlast- und Klimatisierungsfälle laut Tab. 6-1. Fehlerindikatoren geben die Standardabweichungen innerhalb der Fahrzyklengruppen an; **PAH-G**: Parallelhybrid-Pkw mit Ottomotor;

FRT: „Frosttag“; **GRL**: „Nur Grundlast“; **KKL**: „Keine Klimatisierung“; **SOT**: „Sommertag“.



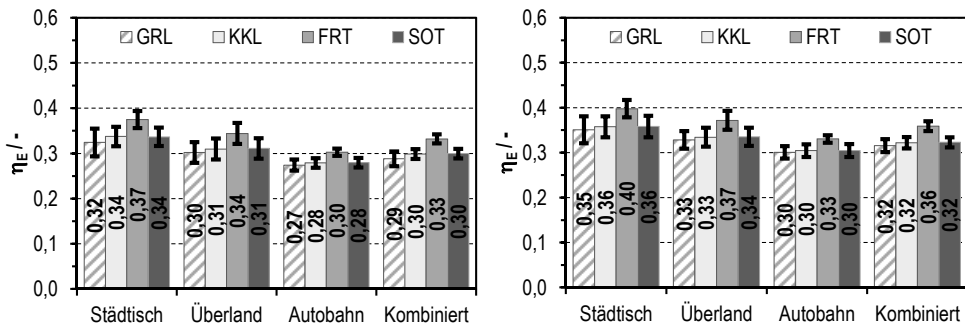
Mittlere differentielle Wirkungsgrade der Stromerzeugung bei PAH-G im Szenario „Zukunft“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Anmerkungen zur Darstellung siehe Bildüberschrift weiter oben.



Mittlere energetische Nutzungsgrade von PAH-G im Szenario „Zukunft“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Anmerkungen zur Darstellung siehe Bildüberschrift weiter oben.



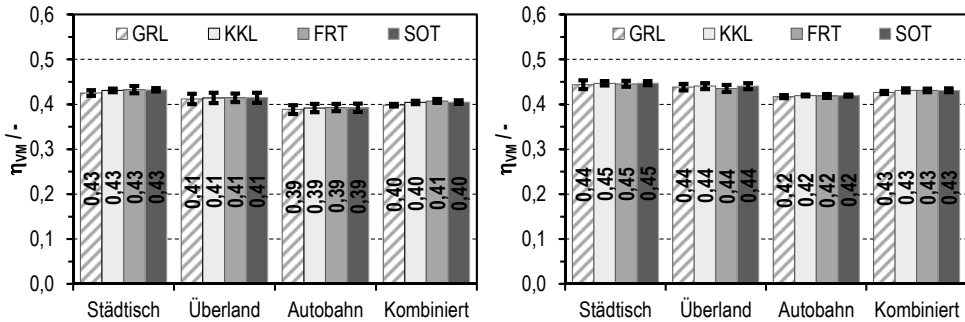
Szenario „Zukunft“, Kraftstoff: Diesel

Mittlere Verbrennungsmotorwirkungsgrade von PAH-D im Szenario „Zukunft“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment.

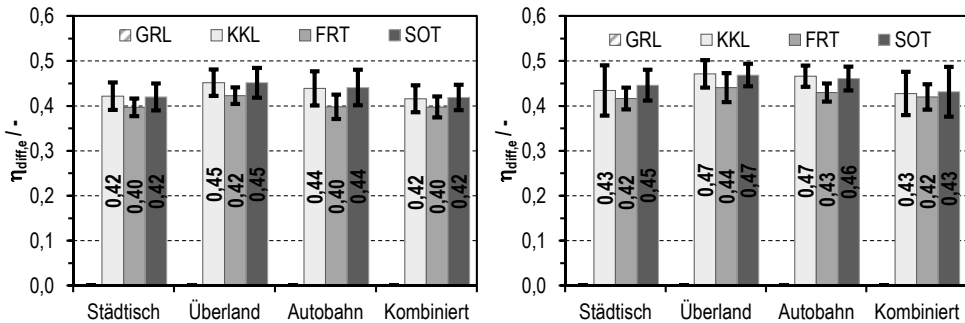
Werte für Bordnetzlast- und Klimatisierungsfälle laut Tab. 6-1. Fehlerindikatoren geben die Standardabweichungen innerhalb der Fahrzyklengruppen an; **PAH-D**: Parallelhybrid-Pkw mit Dieselmotor;

FRT: „Frosttag“; **GRL**: „Nur Grundlast“; **KKL**: „Keine Klimatisierung“; **SOT**: „Sommertag“.



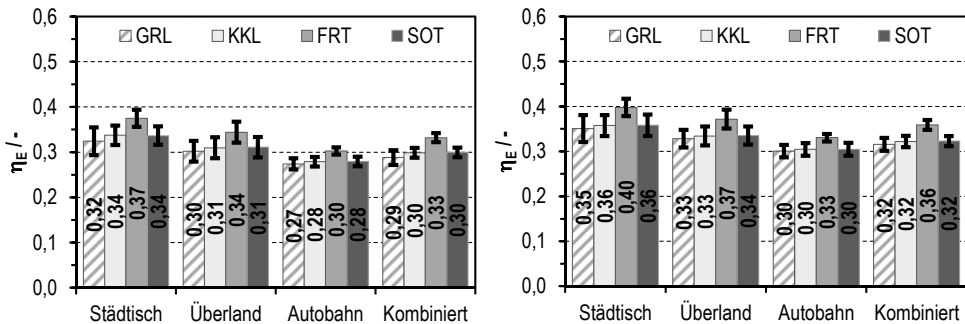
Mittlere differentielle Wirkungsgrade der Stromerzeugung bei PAH-D im Szenario „Zukunft“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Anmerkungen zur Darstellung siehe Bildüberschrift weiter oben.



Mittlere energetische Nutzungsgrade von PAH-D im Szenario „Zukunft“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Anmerkungen zur Darstellung siehe Bildüberschrift weiter oben.



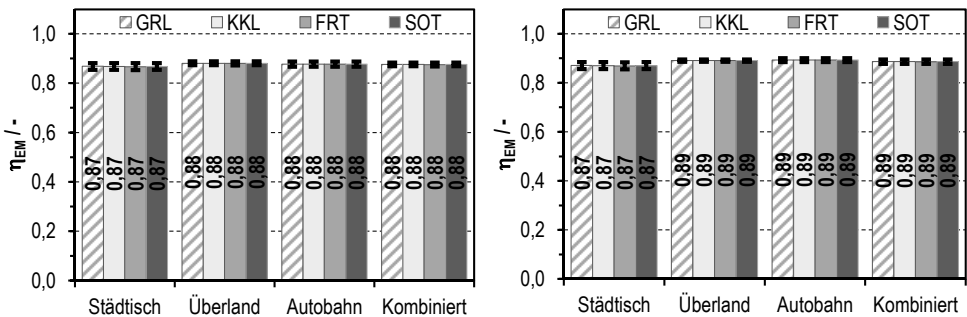
Teil 3: Batterie-Pkw (BEV) – Szenario „Standard“

Mittlere Elektromaschinenwirkungsgrade (Motorbetrieb) von BEV im Szenario „Standard“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment.

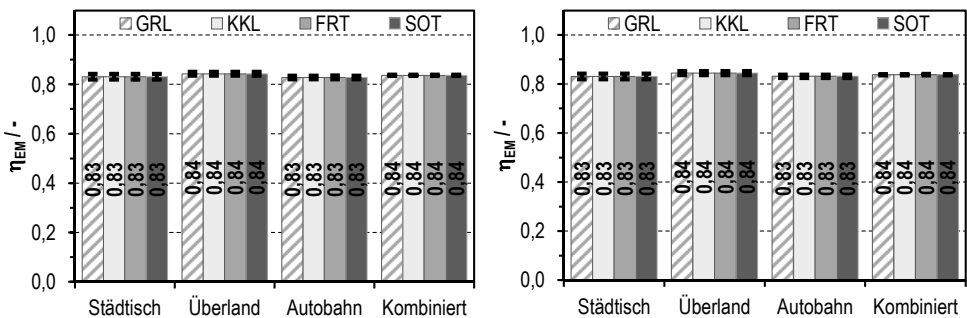
Werte für Bordnetzlast- und Klimatisierungsfälle laut Tab. 6-1. Fehlerindikatoren geben die Standardabweichungen innerhalb der Fahrzyklengruppen an.

BEV: Batterie-Pkw; FRT: „Frosttag“; GRL: „Nur Grundlast“; KKL: „Keine Klimatisierung“; SOT: „Sommertag“.



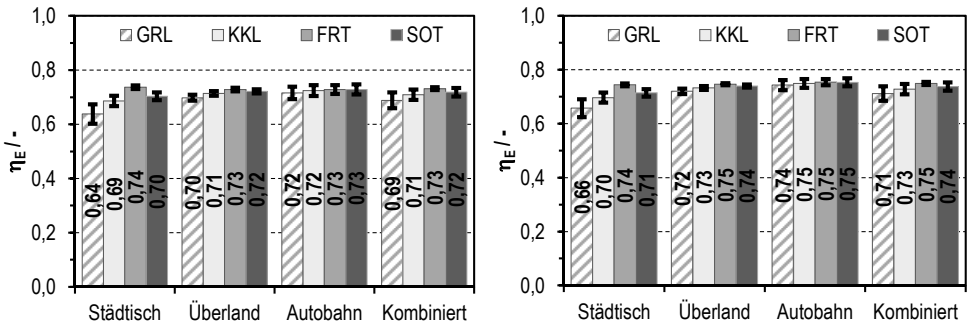
Mittlere Elektromaschinenwirkungsgrade (Generatorbetrieb) von BEV im Szenario „Standard“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Anmerkungen zur Darstellung siehe Bildüberschrift weiter oben.



Mittlere energetische Nutzungsgrade von BEV im Szenario „Standard“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Anmerkungen zur Darstellung siehe Bildüberschrift weiter oben.



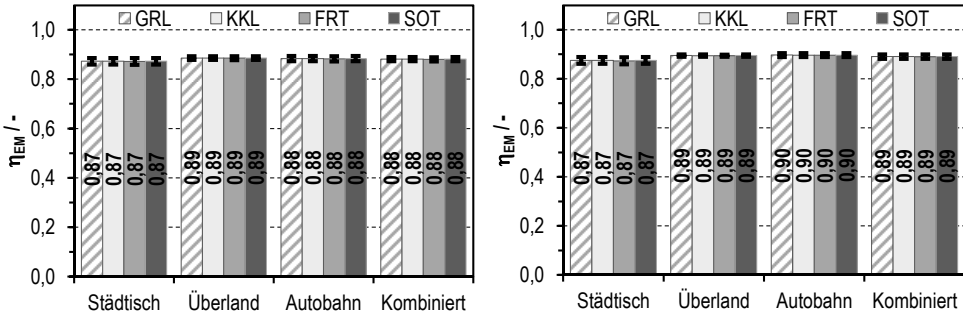
Szenario „Zukunft“

Mittlere Elektromaschinenwirkungsgrade (Motorbetrieb) von BEV im Szenario „Zukunft“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment.

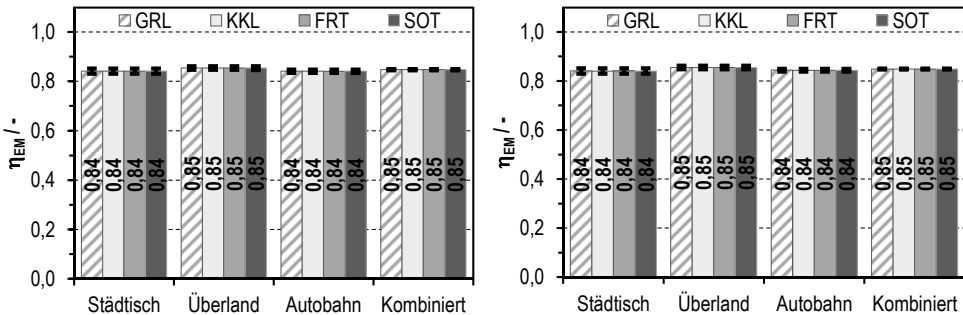
Werte für Bordnetzlast- und Klimatisierungsfälle laut Tab. 6-1. Fehlerindikatoren geben die Standardabweichungen innerhalb der Fahrzyklengruppen an.

BEV: Batterie-Pkw; FRT: „Frosttag“; GRL: „Nur Grundlast“; KKL: „Keine Klimatisierung“; SOT: „Sommertag“.



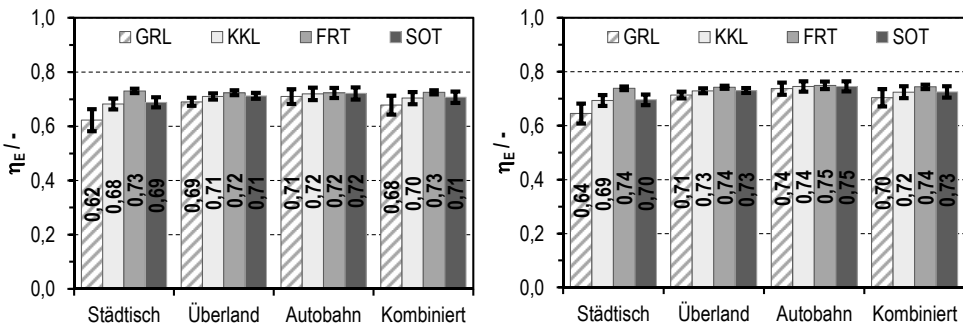
Mittlere Elektromaschinenwirkungsgrade (Generatorbetrieb) von BEV im Szenario „Zukunft“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Anmerkungen zur Darstellung siehe Bildüberschrift weiter oben.



Mittlere energetische Nutzungsgrade von BEV im Szenario „Zukunft“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Anmerkungen zur Darstellung siehe Bildüberschrift weiter oben.



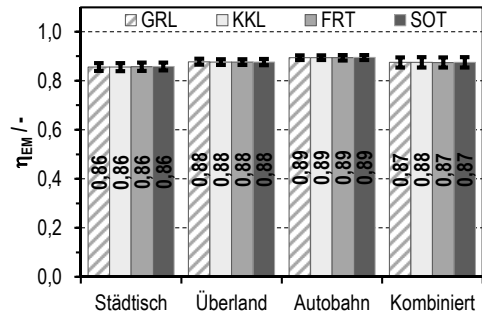
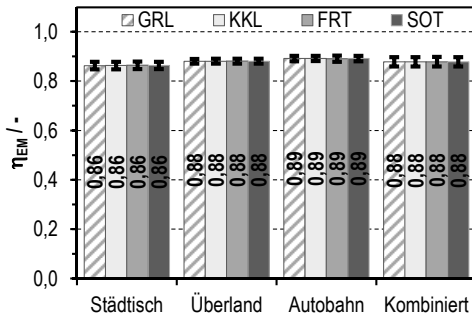
Teil 4: Brennstoffzellen-Pkw (FCV) – Szenario „Standard“

Mittlere Elektromaschinenwirkungsgrade (Motorbetrieb) von FCV im Szenario „Standard“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment.

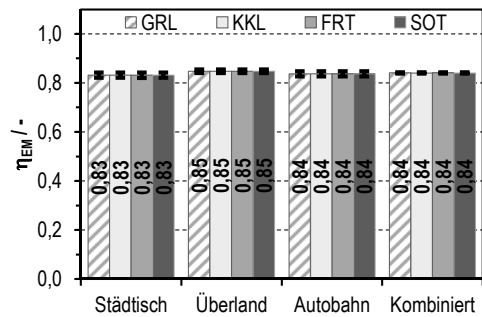
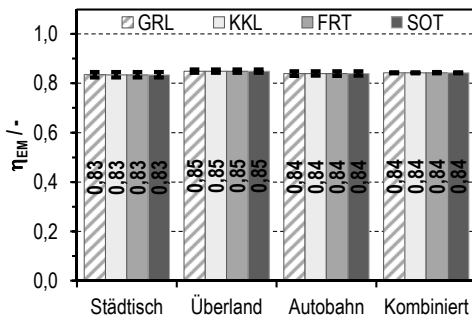
Werte für Bordnetzlast- und Klimatisierungsfälle laut Tab. 6-1. Fehlerindikatoren geben die Standardabweichungen innerhalb der Fahrzyklengruppen an.

FCV: Brennstoffzellen-Pkw; FRT: „Frosttag“; GRL: „Nur Grundlast“; KKL: „Keine Klimatisierung“; SOT: „Sommerstag“.



Mittlere Elektromaschinenwirkungsgrade (Generatorbetrieb) von FCV im Szenario „Standard“.

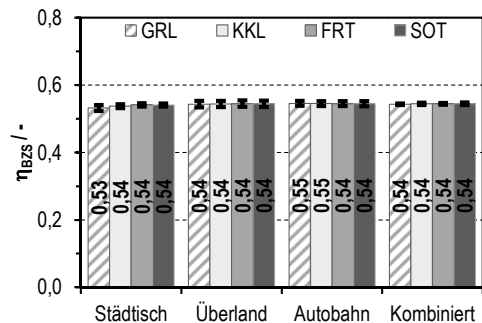
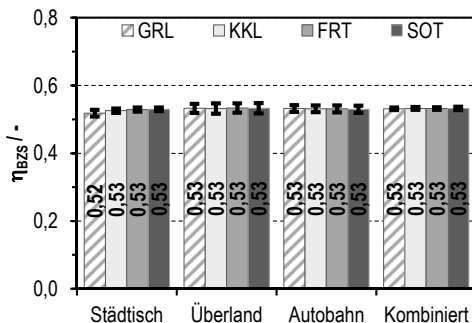
Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Anmerkungen zur Darstellung siehe Bildüberschrift weiter oben.



Mittlere Brennstoffzellensystemwirkungsgrade von FCV im Szenario „Standard“.

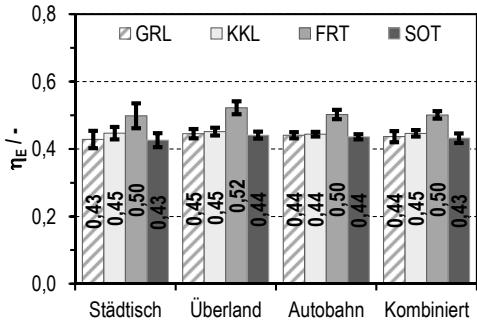
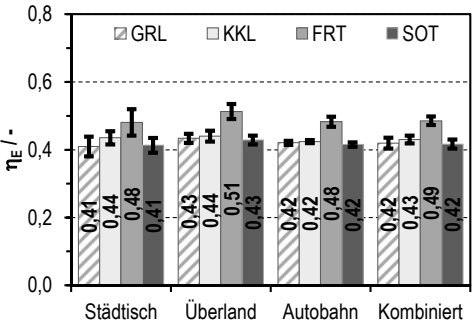
Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Anmerkungen zur Darstellung siehe Bildüberschrift weiter oben.

BZS: Brennstoffzellensystem



Mittlere energetische Nutzungsgrade von FCV im Szenario „Standard“.

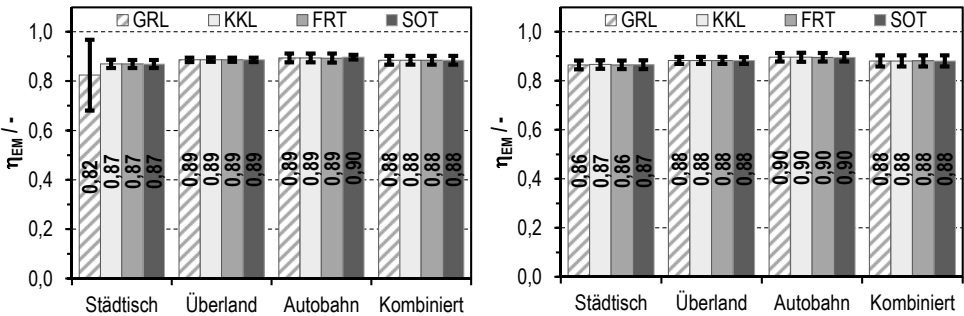
Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Anmerkungen zur Darstellung siehe Bildüberschrift weiter oben.



Szenario „Zukunft“

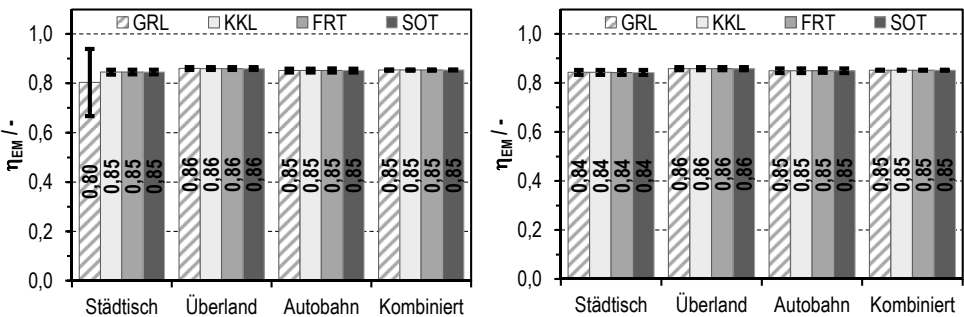
Mittlere Elektromaschinenwirkungsgrade (Motorbetrieb) von FCV im Szenario „Zukunft“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment.
Werte für Bordnetzlast- und Klimatisierungsfälle laut Tab. 6-1. Fehlerindikatoren geben die Standardabweichungen innerhalb der Fahrzyklengruppen an.
FCV: Brennstoffzellen-Pkw; FRT: „Frosttag“; GRL: „Nur Grundlast“; KKL: „Keine Klimatisierung“; SOT: „Sommertag“.



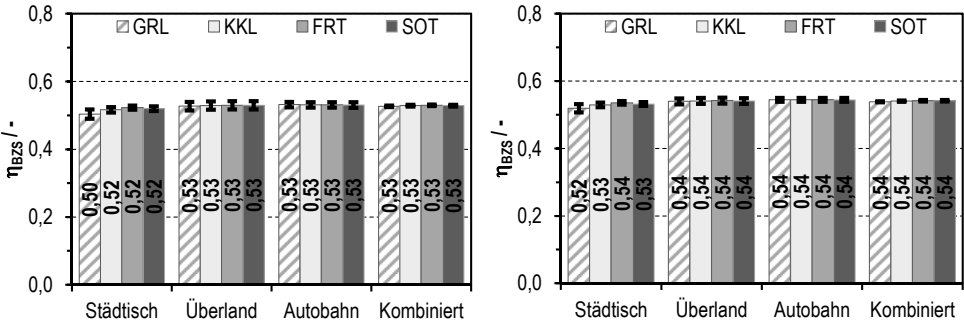
Mittlere Elektromaschinenwirkungsgrade (Generatorbetrieb) von FCV im Szenario „Zukunft“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Anmerkungen zur Darstellung siehe Bildüberschrift weiter oben.



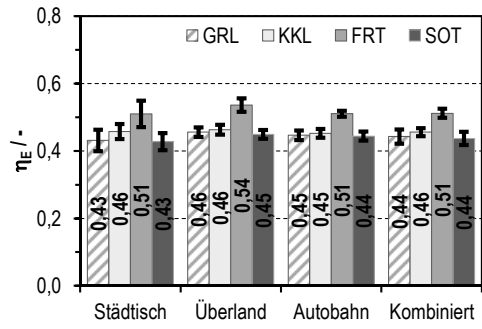
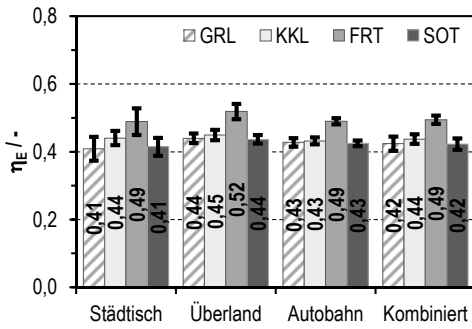
Mittlere Brennstoffzellensystemwirkungsgrade von FCV im Szenario „Zukunft“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Anmerkungen zur Darstellung siehe Bildüberschrift weiter oben.
BZS: Brennstoffzellensystem



Mittlere energetische Nutzungsgrade von FCV im Szenario „Zukunft“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment. Anmerkungen zur Darstellung siehe Bildüberschrift weiter oben.



ANHANG M: ERMITTELTE VERBRAUCHSREDUKTIONSPOTENTIALE

Pkw im Szenario „Zukunft“ gegenüber ICV im Szenario „Standard“

Teil 1: ICV und PAH mit Benzin als Kraftstoff

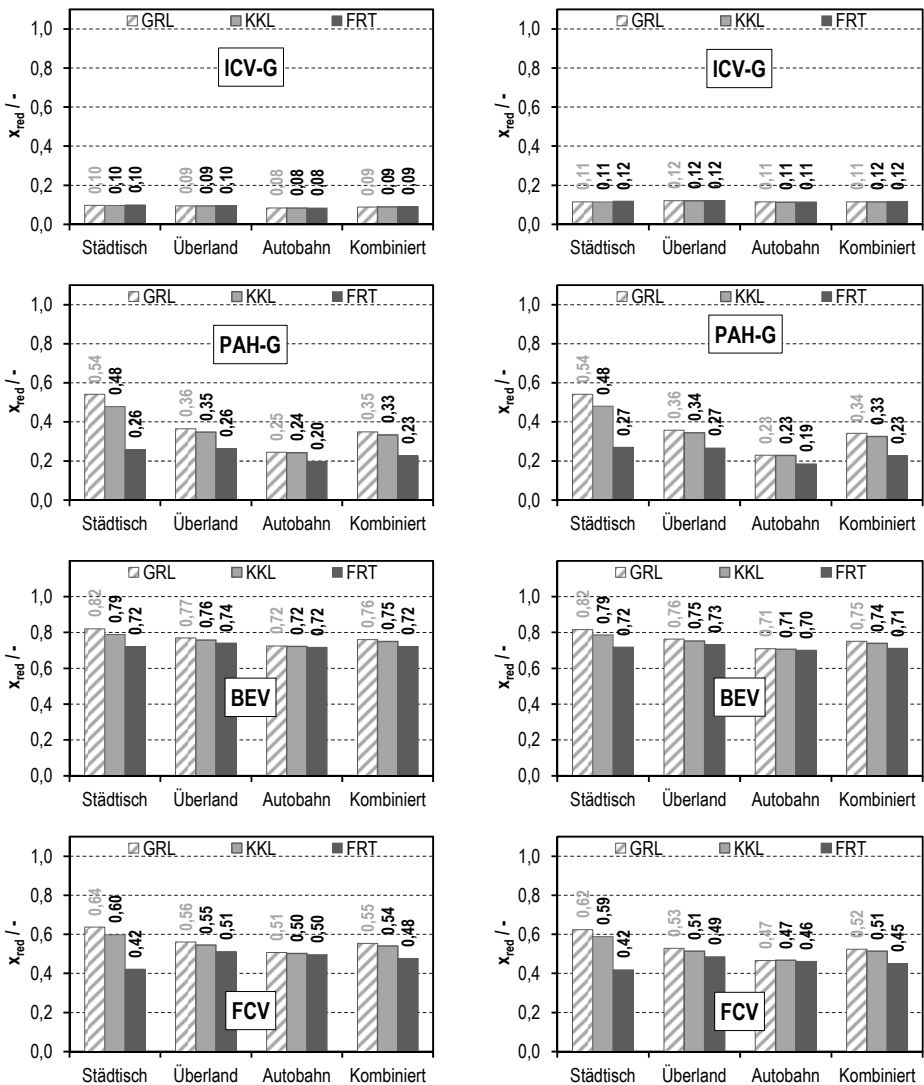
Mittlere Verbrauchsreduktionspotentiale von ICV-G, PAH-G, BEV und FCV im Szenario „Zukunft“ gegenüber ICV-G im Szenario „Standard“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment.

Werte für Bordnetzlast- und Klimatisierungsfälle laut Tab. 6-1.

BEV: Batterie-Pkw; FCV: Brennstoffzellen-Pkw; ICV-G: Verbrennungsmotor-Pkw mit Ottomotor;

PAH-G: Parallelhybrid-Pkw mit Ottomotor; FRT: „Frosttag“; GRL: „Nur Grundlast“; KKL: „Keine Klimatisierung“.



Teil 2: ICV und PAH mit Diesel als Kraftstoff

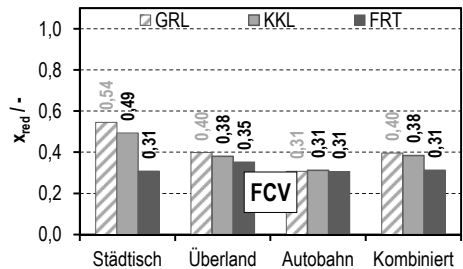
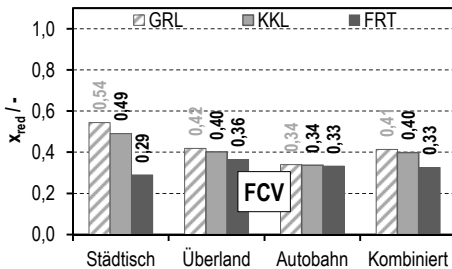
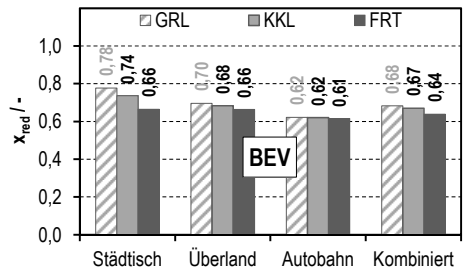
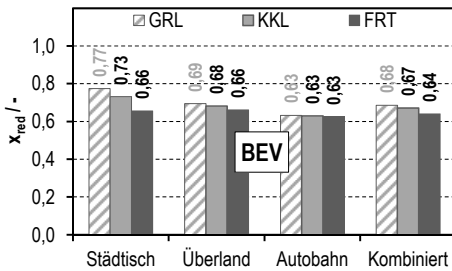
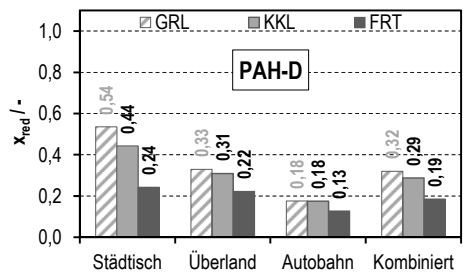
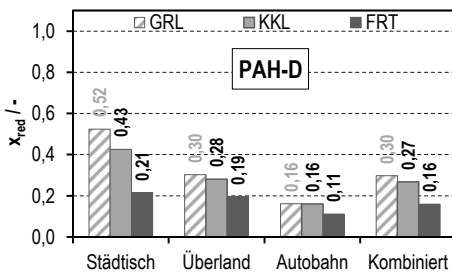
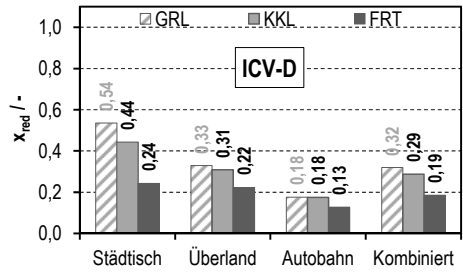
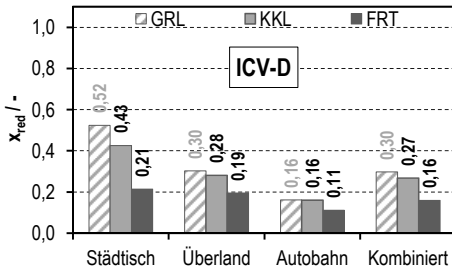
Mittlere Verbrauchsreduktionspotentiale von ICV-D, PAH-D, BEV und FCV im Szenario „Zukunft“ gegenüber ICV-D im Szenario „Standard“.

Links: A-Segment; rechts: C-Segment.

Werte für Bordnetzlast- und Klimatisierungsfälle laut Tab. 6-1.

BEV: Batterie-Pkw; FCV: Brennstoffzellen-Pkw; ICV-D: Verbrennungsmotor-Pkw mit Dieselmotor;

PAH-D: Parallelhybrid-Pkw mit Dieselmotor; FRT: „Frosttag“; GRL: „Nur Grundlast“; KKL: „Keine Klimatisierung“.



DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlich-technischer Mitarbeiter am Forschungszentrum Jülich im Institut für Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-3). Das hervorragende und sehr kollegiale Arbeitsumfeld dieses Instituts möchte ich an dieser Stelle ausdrücklich erwähnen.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr. rer. nat. Volker Schindler für die spontane Bereitschaft, die Betreuung meiner Dissertation zu übernehmen sowie für die freundliche und umfassende Unterstützung in allen Belangen, die sowohl mit deren Erstellung als auch mit dem Promotionsverfahren an der Technischen Universität Berlin verbunden waren. Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Detlef Stolten bedanke ich mich sehr herzlich für die Übernahme der Funktion des Zweitgutachters, ganz besonders jedoch für die langjährige Unterstützung meines Promotionsvorhabens. Ohne den mir gewährten Freiraum, einen Teil der Arbeit im Rahmen meiner dienstlichen Tätigkeit durchzuführen, wäre die Erstellung meiner Dissertation nicht möglich gewesen.

In besonderer Weise möchte ich die freundschaftliche und fachliche Begleitung meines Werdegangs durch Herrn Prof. Dr.-Ing. Bernd Höhlele hervorheben; zunächst als Professor an der Fachhochschule in Jülich und später als Leiter der Abteilung Verfahrens- und Systemanalyse, in der ich seit 1997 tätig bin. Während der Bearbeitung der vorliegenden Dissertation waren die zahlreichen Diskussionen stets motivierend und das Korrekturlesen sehr hilfreich.

Darüber hinaus möchte ich mich bei den Kolleginnen und Kollegen der Abteilung Verfahrens- und Systemanalyse bedanken, deren Unterstützung besonders in der letzten Phase der Anfertigung meiner Dissertation sehr hilfreich gewesen ist. Von großem Wert waren darüber hinaus die vielen Diskussionen mit meinem langjährigen Kollegen, Herrn Dipl.-Ing. Andreas Tschauder aus der Abteilung Brenngaserzeugung und Systeme, dessen breites Fachwissen im Bereich der Fahrzeugtechnik ich an dieser Stelle würdigen möchte.

Schließlich bedanke ich mich für die große Unterstützung während der Promotionszeit bei meiner Frau Nina und meinen beiden Kindern Anna und Lea, die mir in sehr geduldiger und rücksichtsvoller Weise den notwendigen Freiraum für diese Arbeit gegeben haben.

Band / Volume 203

**Politiksznarien für den Klimaschutz VI –
Treibhausgas-Emissionsszenarien bis zum Jahr 2030
Advances in Systems Analysis 5**

P. Hansen, S. Gores und F. Chr. Matthes (Hrsg.)

(2013), XX, 257 pp

ISBN: 978-3-89336-932-4

Band / Volume 204

**Effect of Composition, Microstructure and Component Thickness
on the Oxidation Behaviour of Laves Phase Strengthened Interconnect
Steel for Solid Oxide Fuel Cells (SOFC)**

C. Asensio Jimenez (2014), 210 pp

ISBN: 978-3-89336-935-5

Band / Volume 205

**Airborne VOC measurements on board the Zeppelin NT during the
PEGASOS campaigns in 2012 deploying the improved Fast-GC-MSD
System**

J. Jäger (2014), VIII, 182 pp

ISBN: 978-3-89336-936-2

Band / Volume 206

**Pulvermetallurgische Funktionsbauteile aus NiTi- und NiTi-X
Legierungspulvern**

M. Bitzer (2014), III, 144 pp

ISBN: 978-3-89336-937-9

Band / Volume 207

**Zinkoxid: Einfluss von Dotierung und Legierungen auf elektro-optische
Eigenschaften, auf das Ätzverhalten und auf die Tempernachbehandlung**

M. Warzecha (2014), 8, vii, 170 pp

ISBN: 978-3-89336-938-6

Band / Volume 208

**SGSreco - Radiologische Charakterisierung von Abfallfässern
durch Segmentierte γ -Scan Messungen**

T. H. Krings (2014), ix, 181, XI

ISBN: 978-3-89336-945-4

Band / Volume 209

**Kühlkonzepte für Hochtemperatur-Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen-
Stacks**

J. Supra (2014), III, 191 pp

ISBN: 978-3-89336-946-1

Band / Volume 210

**Eigenschaften des Phosphorsäure-Polybenzimidazol-Systems
in Hochtemperatur-Polymerelektrolyt-Brennstoffzellen**

A. Majerus (2014), viii, 141 pp

ISBN: 978-3-89336-947-8

Band / Volume 211

Study on the Complex Li-N-H Hydrogen Storage System

L. Du (2014), I, 132 pp

ISBN: 978-3-89336-952-2

Band / Volume 212

**Transport and Retention of Stabilized Silver Nanoparticles
in Porous Media**

Y. Liang (2014), IV, 109 pp

ISBN: 978-3-89336-957-7

Band / Volume 213

**Effizienzoptimierte CO₂-Abtrennung in IGCC-Kraftwerken
mittels Wassergas-Shift-Membranreaktoren**

S. T. Schiebahn (2014), XXII, 203 pp

ISBN: 978-3-89336-958-4

Band / Volume 214

**Lebensdauer und Schädigungsentwicklung martensitischer Stähle für
Niederdruck-Dampfturbinenschaufeln bei Ermüdungsbeanspruchung
im VHCF-Bereich**

S. Kovacs (2014), IV, 140 pp

ISBN: 978-3-89336-959-1

Band / Volume 215

Micro- and Macro- Mechanical Testing of Transparent MgAl₂O₄ Spinel

O. Tokarev (2014), X, 99 pp

ISBN: 978-3-89336-960-7

Band / Volume 216

**Potentiale des Strommanagements zur Reduzierung
des spezifischen Energiebedarfs von Pkw**

T. Grube (2014), IX, 255 pp

ISBN: 978-3-89336-961-4

Weitere **Schriften des Verlags im Forschungszentrum Jülich** unter
<http://wwwzb1.fz-juelich.de/verlagextern1/index.asp>

Kurzzusammenfassung:

Im Kontext energiestrategischer Zielsetzungen werden unter anderem reduzierte Umweltwirkungen von Fahrzeugen angestrebt. Aktuelle Entwicklungen beziehen sich auf verbesserte Antriebe mit Verbrennungsmotor sowie auf teilweise oder vollständig elektrifizierte Antriebssysteme. Die vergleichende Bewertung solcher Konzepte erfordert insbesondere die Analyse des Kraftstoffverbrauchs unter möglichst realistischen Einsatzbedingungen. Heute als Typprüfwerte oder Messwerte für Serien- und Konzept-Pkw verfügbare Angaben sind in dieser Hinsicht nur eingeschränkt verwendbar, da verbrauchsbestimmende Einflussfaktoren, die mit der Auswahl von Fahrprofilen sowie mit der Art und Weise des Betriebs von Nebenverbrauchern zusammenhängen, meist nicht ausreichend berücksichtigt werden.

Dieses Buch befasst sich mit der Bestimmung von Verbrauchsreduktionspotentialen für Pkw mit Verbrennungsmotor, Parallelhybrid-Pkw sowie für Elektro-Pkw mit Brennstoffzellen und mit Batterie. Maßgeblich für die Entwicklung einer dazu eingesetzten Simulationsumgebung waren einheitliche Vorgehensweisen bei der Gestaltung und Parametrierung der dynamischen Simulationsmodelle, der Fahrzyklusauswahl sowie der Vorgabe von elektrischen und thermischen Lastprofilen. Die Anwendung dieser Simulationsumgebung hat gezeigt, dass konzeptspezifische Verbrauchsunterschiede für eine große Breite an Nutzungsprofilen von Pkw bei vertretbarem Zeitaufwand für die Bearbeitung aufgezeigt werden können. Eine verbesserte Bewertung des Verbrauchsverhaltens von Pkw ist anhand der nun zur Verfügung stehenden Ergebnisse möglich.

Autor:

Thomas Grube studierte an der Fachhochschule Aachen Maschinenbau in der Studienrichtung Energie- und Umweltschutztechnik und an der Rheinischen Fachhochschule Köln Wirtschaftsingenieurwesen. Seit 1998 beschäftigt er sich am Institut für Energie- und Klimaforschung – Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-3) mit der technischen und wirtschaftlichen Bewertung von Energiesystemen. Besondere Schwerpunkte seiner Arbeit sind die simulationsgestützte Kraftstoffverbrauchsanalyse von Pkw-Antrieben und die Bilanzierung von Prozessketten der Kraftstoffversorgung. Der Inhalt dieses Buches wurde von der Technischen Universität Berlin als Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigt.

Institut:

Die Forschungsaufgaben des Instituts für Energie- und Klimaforschung – Elektrochemische Verfahrenstechnik (IEK-3) sind auf die Realisierung von Hoch- und Niedertemperaturbrennstoffzellen sowie von entsprechenden Stacks oder Systemen für stationäre oder mobile Anwendungen ausgerichtet. Ferner umfassen die verfahrens- und systemtechnischen Entwicklungen die Bereitstellung von Apparaten zur Brenngaserzeugung. Darüber hinaus zielt das IEK-3 auf die Bereitstellung von Anlagen zur großtechnischen Erzeugung von Wasserstoff mittels Elektrolyseuren mit Polymerelektrolytmembranen. Für eine tiefgehende Aufklärung von Strukturen und deren Wirkung sowie von energetischen Prozessketten werden die Arbeiten von physikalisch-chemischen Grundlagenuntersuchungen sowie systemanalytischen Studien der Energieverfahrenstechnik begleitet.